

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Cleber Marques

**PROSPECÇÕES DA NATUREZA FÍSICA DA SOLDAGEM MIG
AUTOMÁTICA DE LIGAS DE ALUMÍNIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra

Coorientador: Dr. Eng. Raul Gohr Jr

Florianópolis

2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Marques, Cleber

Prospecções da natureza física da soldagem MIG automática
de ligas de alumínio / Cleber Marques ; orientador, Jair
Carlos Dutra ; co-orientador, Raul Gohr Jr.. -
Florianópolis, SC, 2013.
101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem de alumínio. 3. MIG
Convencional. 4. CMT (Cold Metal Transfer). 5. MIG
Pulsado. I. Dutra, Jair Carlos. II. Gohr Jr., Raul . III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Cleber Marques

PROSPECÇÕES DA NATUREZA FÍSICA DA SOLDAGEM MIG AUTOMÁTICA DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de fevereiro de 2013.

Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng.
Coordenador do curso

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

Raul Gohr Jr, Dr. Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Iconomos Baixo
Fundação CERTI

Prof. Dr. Nelso Gauze Bonacorso
Instituto Federal de Educação Tecnológica

Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha esposa Elaine,
minha filha Luiza e
aos meus pais João e Aneliza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão deste trabalho:

- Ao meu orientador, professor Jair Carlos Dutra, pela oportunidade em participar do grupo LABSOLDA, pelos conhecimentos transmitidos e por suas contribuições na escrita deste trabalho;
- Ao Eng. Raul Gohr Jr., pela sua coorientação e suporte nas atividades desenvolvidas;
- Ao Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pelos conhecimentos transmitidos;
- Aos companheiros que atuaram diretamente nos ensaios realizados, Augusto Fernandes Cordeiro de Andrade, Bruna Martinello Savi, Cleber Guedes, Diego Erdmann dos Santos, Erwin Werner Teichmann, Everton Werlang, Hellinton Direne Filho, Pedro Bruciapaglia;
- À toda equipe do LABSOLDA, Eduardo Bidese Puhl, Felipe Kalil Mendonça, Fernando Costenaro, João Facco de Andrade, Marcelo Pompermaier Okuyama, Márcia Paula Thiel, Mateus Barancelli Schwerdersky, Marcus Barnetche, Rafael Polezi Lucas, Ricardo Campagnin;
- À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica;
- À CAPES e à ANP/PETROBRAS pela concessão de bolsas;
- À FINEP, pelo fornecimento de recursos para o projeto do Veleiro UFSC60, convênio nº 01.10.0487.01;
- À minha família, pelo apoio incondicional.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de
pensar, não seremos capazes de resolver os
problemas causados pela forma como nos
acostumamos a ver o mundo”.
(Albert Einstein)

RESUMO

Como processo de fabricação, a soldagem tem um papel de destaque dentro dos setores naval e petrolífero. Nesses setores, a utilização de ligas de alumínio como material para a fabricação de estruturas vem ocupando cada vez mais espaço. Inserido neste contexto, o LABSOLDA vem desenvolvendo conhecimento e tecnologias abrangentes e com uma missão específica de execução da soldagem de um veleiro em alumínio para pesquisas oceanográficas em que a presente dissertação de mestrado é parte integrante. Ela apresenta contribuições técnico-científicas no campo da tecnologia com transferência metálica sem curto-circuito por meio da pulsação da corrente e com a recente tecnologia de transferência metálica por curto-circuito denominada de CMT (Cold Metal Transfer). Em primeiro momento, os ensaios realizados tiveram o foco na obtenção de um procedimento automático de soldagem de raiz em chapas de ligas de alumínio com 6 mm de espessura. Para isso foram analisados os fundamentos de diferentes variantes do processo MIG/MAG, com destaque para a versão CMT. Em comparação com o MIG convencional, os resultados alcançados com o CMT revelaram um grande potencial de aplicação dessa tecnologia para a realização da soldagem de raiz em alumínio. Justamente por causa de uma maior potência do arco em relação ao MIG convencional é que esta tecnologia produz soldas de raiz com elevada performance. Isto é constatado em ensaios que avaliam a característica de fusão do arame ER5183. Assim, ficou demonstrado que o MIG CMT pode ser considerado como tendo uma transferência fria somente se comparado com o pulsado tradicional, mas não em relação ao MIG convencional. As características do CMT se revelaram como as melhores para a soldagem de raiz, incluindo as posições diferentes da plana. A cadência da corrente e da tensão revela uma grande semelhança com uma corrente pulsada de onda retangular, mas dentro da faixa de transferência por curto-circuito. A utilização da soldagem MIG pulsada é tratada em um segundo momento, onde os ensaios foram dirigidos para a avaliação de vários conjuntos de corrente de pulso e tempo de pulso, constituindo diferentes parâmetros de destacamento e também diferentes diâmetros de gota. É analisado o relacionamento entre as referidas variáveis, considerando o expoente da corrente de pulso igual a 2,3, segundo o pesquisador Amin, e o expoente 2,0, segundo a maioria das adoções da literatura. Foi encontrado, entretanto, o valor de 1,83 como o melhor expoente para o arame ER4043. Foi demonstrado

também que a melhor condição de destacamento é quando esta ocorre logo depois da fase de pulso. Os resultados de parâmetros de pulso que ofereceram os melhores resultados já estão sendo aplicados em fontes de soldagem comerciais.

Palavras-chave: Soldagem de alumínio, Cold Metal Transfer (CMT), MIG Convencional, potência de soldagem, MIG pulsado, destacamento de gotas.

ABSTRACT

As manufacturing process, welding has a prominent role within the marine and oil industries. In these sectors, the use of aluminum alloys as material of structures fabrication is occupying more space. Within this context, the LABSOLDA has developed extensive knowledge and technologies with a specific mission of execute welding on a aluminum sailboat for oceanographic research on which this dissertation is an integral part. It presents scientific and technical contributions in the field of technology with metal transfer without short-circuiting through the current pulse and with the latest technology of metal transfer by short circuit called CMT (Cold Metal Transfer). At first moment, the focus of tests was obtaining an automatic procedure root welding on 6 mm aluminum plates. For this were analyzed the foundations of different variants of MIG / MAG, highlighting the version CMT. Compared with the conventional MIG, the results achieved with CMT have revealed great potential for application of this technology to perform the aluminum root welding. Justly because of a greater power of the arc in relation to the conventional MIG is that this technology produces root welding with high performance. This is demonstrated by tests which evaluate the melting characteristics of the wire ER5183. It was found that MIG CMT can be considered a cold transfer only if compared to traditional pulsed, but not when compared to conventional MIG. The characteristics of CMT proved as the best for welding of root, including in forced positions. The cadence of the current and voltage shows a great similarity with a pulsed current rectangular wave, but within the range of short circuit transfer. The use of pulsed MIG welding is treated in a second stage, where the tests were directed to evaluate several sets of pulse current and pulse time, representing different detachment parameters and also different drop diameters. It examines the relationship between those variables, considering the exponent of the current pulse equal to 2.3, according to the researcher Amin and the exponent 2.0, according to most adoptions literature. It was found, however the value 1.83 as the best exponent for the wire ER4043. It was also shown that the best condition of detachment is when this occurs shortly after the pulse phase. The results of pulse parameters that provided the best results are already being applied in commercial welding power supplies.

Keywords: Welding aluminum, Cold Metal Transfer (CMT), conventional MIG, welding power, MIG pulse, droplet detachment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oscilogramas de tensão, corrente e potência para o modo MIG convencional, arame ER5183 com $\varnothing = 1,2$ mm, $V_a = 6$ m/min ...	32
Figura 2 – Oscilogramas de tensão, corrente e potência para o modo CMT, arame ER5183 com $\varnothing = 1,2$ mm, $V_a = 6$ m/min	34
Figura 3 – Comportamento do arco MIG nas polaridades positiva e negativa, CMT Advanced, arame ER4043 1,2mm.....	36
Figura 4 – Movimento de avanço e recuo do arame na variante CMT [22]	37
Figura 5 – Disposição de componentes básicos de um sistema CMT. 1 – Fonte de Alimentação; 2 – Cabeçote alimentador; 3 – Refrigeração; 4 – Interface para Robô; 5 – Unidade de Controle Remoto (RCU 5000i); 6 – Buffer de arame; 7 – Tocha; 8 – Dispositivo manipulador (Robô); 9 – Gás de proteção [22]	38
Figura 6 – Visão geral das curvas características do modo CMT [23]..	40
Figura 7 – Oscilogramas de tensão, corrente para o modo CMT, soldagem de alumínio ER5183	40
Figura 8 – Visão geral das curvas características do modo CMT Pulse [23]	41
Figura 9 – Visão geral das curvas características do modo CMT Advanced [23].....	43
Figura 10 – Visão geral das curvas características do modo CMT Advanced PULSE [23].....	44
Figura 11 – Variação dos níveis de tensão devido à remoção da camada de óxido [27]	47
Figura 12 – Metodologia de controle do comprimento do arco para o CMT [27]	48
Figura 13 – Comparativo de oscilogramas de velocidade de arame	49
Figura 14– Esquema de movimentação da tocha com variação de altura. A – Variação lenta de altura (adaptado de [30]); B – Variação brusca de altura em 2 Hz e $v = 50$ cm/min	50
Figura 15 – Resposta na velocidade de arame. A – movimento de tecimento em 2 Hz; B – movimento de tecimento em 4 Hz.....	50
Figura 16 – Diferença nos tempos de curto-circuito em condição de extrema variação na altura da tocha no modo CMT.....	51
Figura 17 – Gráficos comparativos entre variantes CMT e MIG pulsado [27]	52

Figura 18 – Faixa regulável de aporte térmico para as versões CMT Advanced [27].....	52
Figura 19 – Depósito realizado com a versão MIG CMT.....	54
Figura 20 – Depósito realizado com a versão MIG CMT Pulse	54
Figura 21– Depósito realizado com a versão MIG CMT Advanced.....	54
Figura 22 – Depósito realizado com a versão MIG CMT Advanced Pulse, relação de 10 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo	54
Figura 23 – Depósito realizado com a versão MIG CMT Advanced Pulse, relação de 25 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo	54
Figura 24 – Depósito realizado com a versão MIG CMT para o arame ER5183; Em cima, regulagem de 6,0 m/min; abaixo regulagem de 5,4 m/min	55
Figura 25 – Oscilograma de tensão e corrente para a soldagem MIG CMT, arame ER4043, regulagem de Va em 6 m/min.....	56
Figura 26 – Oscilograma de tensão e corrente para a soldagem MIG CMT, arame ER5183, regulagem de Va em 6 m/min.....	57
Figura 27 – Oscilograma de tensão e corrente para a soldagem MIG CMT, arame ER5183, regulagem de Va em 5,4 m/min.....	57
Figura 28 – Oscilograma de tensão, corrente e Velocidade de arame para a versão CMT Advanced, 7 ciclos em cada polaridade	58
Figura 29 – Oscilograma de tensão, corrente e Velocidade de arame para a versão CMT Advanced, 100 ciclos no positivo e 50 no negativo	59
Figura 30 – Oscilograma de tensão, corrente e Velocidade de arame para a versão CMT Advanced Pulse, 10 pulsos no positivo e 10 ciclos no negativo.....	59
Figura 31 – Detalhe do período de pulsação de corrente no CMT Advanced pulse.....	60
Figura 32 – Problema na soldagem de raiz, posição vertical ascendente, modo MIG Convencional.....	61
Figura 33 – Problemas gerais encontrados na soldagem de raiz de ligas de alumínio; A – efeito de rechupe e porosidade; B – excesso de material e trincas; C – falha de fusão, baixa penetração, fechamento do gap.....	62
Figura 34 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: Arame ER5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio), conforme Kiyohara et al [32].....	63
Figura 35 – Curva de isoconsumo para o alumínio ER5183 com 1,2 mm de diâmetro, gás Argônio e velocidade de alimentação de arame de 0,1 m/s (6,0 m/min).....	65

Figura 36 – Solda manual de Liga de Alumínio 5083 com arame ER5183, posição plana, chapa de 6 mm com MIG CMT regulagem de corrente em 110 A, V_a média = 7,0 m/min	66
Figura 37 – Solda manual de Liga de Alumínio 5083 com arame ER5183, posição plana, chapa de 6 mm com MIG Convencional regulagem de tensão em 14 V, V_a = 7,0 m/min, $K_s=60$, $K_d=50$	67
Figura 38 – Bancada de ensaios com detalhe na configuração da junta e backing de cobre	68
Figura 39 – Soldagem de raiz em alumínio naval comparando MIG Convencional e CMT na posição plana.....	68
Figura 40 – Secção transversal das soldagens mecanizadas com $v = 40$ cm/min e $V_a = 7,0$ m/min, em: A – MIG Convencional, B – MIG CMT	69
Figura 41 – Solda de raiz em liga de alumínio naval 5083, MIG CMT com regulagem de corrente em 110 A, V_a média = 7,0 m/min, posição vertical ascendente, arame ER5183 de 1,2 mm. A – cordão de solda; B – raiz da solda; C - Macrografia.....	69
Figura 42 – Oscilogramas hipotéticos de tensão e corrente para uma situação próxima ao CMT	72
Figura 43 – Oscilogramas hipotéticos de tensão e corrente para uma situação próxima ao MIG Convencional.....	72
Figura 44 – Oscilogramas de Tensão x Corrente para as curvas hipotéticas do CMT e MIG convencional	73
Figura 45 – Histogramas dos períodos de transferência num intervalo de 5 segundos, em: A – MIG Convencional, B – MIG CMT	75
Figura 46 – Curvas representativas de parâmetros de destacamento de gota (Curvas sobrepostas para os grupos 1 e 4 do gráfico $D=I_p^2 \cdot t_p$)	82
Figura 47 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 160$ A, $t_p= 5,7$ ms, $I_b= 18$ A, $t_b= 7,3$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm	83
Figura 48 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 47.....	84
Figura 49 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 160$ A, $t_p= 5,7$ ms, $I_b= 53$ A e $t_b= 16,8$ ms e diâmetro de gota de 1,44 mm	85
Figura 50 - Cordão de solda referente aos dados da Figura 49	85
Figura 51 – Comportamento da transferência metálica para o segundo grupo de ensaios ($I_p=300$ A e $t_p=2$ ms);	86
Figura 52 – Destacamento de gota para o conjunto cód.7 com $I_p= 350$ A, $t_p= 0,8$ ms, $I_b= 57$ A e $t_b= 9,2$ ms para diâmetro de gota de 1,1 mm	86

Figura 53 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 350$ A, $t_p = 0,8$ ms, $I_b = 62$ A e $t_b = 12,2$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm	87
Figura 54 - Depósito de solda referente à Figura 53	87
Figura 55 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 350$ A, $t_p = 0,8$ ms, $I_b = 70$ A e $t_b = 21,7$ ms e diâmetro de gota de 1,44 mm	88
Figura 56 - Comportamento da transferência metálica ($I_p = 350$ A; $t_p = 1,2$ ms); A – Alongamento da gota no conjunto 11 com $d_g = 1,2$ mm; B – Formação de respingos no conjunto 12 com $d_g = 1,44$	89
Figura 57 - Depósito de solda com $I_p = 350$ A, $t_p = 1,2$ ms, $I_b = 37$ A e $t_b = 8,8$ ms e diâmetro de gota de 1,1 mm	89
Figura 58 – Aquisição de dados referentes aos depósitos para validação da relação $I_p^{1,83} \cdot t_p = D$	91
Figura 59 – Oscilograma de tensão e corrente que mostra a atuação do sistema adaptativo de controle da altura do arco	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio de acordo com o principal elemento de liga	27
Tabela 2 – Dados aquisitados para diferentes versões do MIG CMT ...	55
Tabela 3 – Dados adquiridos com o SAP para fase positiva e negativa do CMT Advanced.....	58
Tabela 4 – Dados adquiridos com o SAP para fase positiva e negativa do CMT Advanced Pulse	60
Tabela 5 – Valores médios de Tensão, Corrente e Potência, correspondentes a faixa de operação do CMT na curva de isoconsumo para o arame ER5183	71
Tabela 6 – Dados calculados para as situações hipotéticas de CMT e MIG Convencional.....	73
Tabela 7 – Parâmetros adquiridos em soldagem de raiz manual, com velocidade de arame de 7 m/min.....	74
Tabela 8 – Dados da soldagem de raiz comparativa entre MIG convencional e CMT, com valor do rendimento bruto de fusão	77
Tabela 9 – Conjunto de parâmetros de soldagem MIG-P, com cálculo de ϕ e constante de destacamento de gotas (D).....	82
Tabela 10 – Conjunto de variáveis de soldagem MIG-P com $I_p = 240$ A e valores de ϕ	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Å – Angstrom
A_f – Área fundida
CMT – Cold Metal Transfer
C_p – calor específico
D – Parâmetro de destacamento de gota
DBCP – Distância entre o Bico de Contato e a Peça
dg – diâmetro de gota
E – Energia fornecida pela fonte (J/cm)
f – frequência de pulsação de corrente
gap – distância ou abertura entre chapas em uma junta
I_b – corrente de base
I_{ef} – corrente eficaz
I_i – corrente instantânea
I_m – corrente média
I_p – corrente de pulso
LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da UFSC
L_f – Calor Latente de fusão (J/g)
MIG AC – Metal Inert Gas Alternate Current
MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas
P – Potência (W)
Q – entalpia de fusão
Q_f – calor usado para a fusão do material (J/cm)
SAP – Sistema de Aquisição Portátil
T – período
t_b – tempo de base
t_p – tempo de pulso
T_f – Temperatura de fusão (°C)
T_o – Temperatura inicial (°C)
U_{ef} – tensão eficaz
U_i – tensão instantânea
U_m – tensão média
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
v – Velocidade de soldagem
V_a – Velocidade de arame
ρ – densidade
φ – fator adimensional proposto por Gosh [11,12]
η_{bf} – rendimento bruto de fusão por Reis et al [41]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	25
1.1.	ESTRUTURA DO TEXTO	27
2.	FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICOS.....	29
2.1.	ASPECTOS GERAIS DA SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO	29
2.2.	VARIANTES DO PROCESSO MIG/MAG	30
2.3.	O USO DA POLARIDADE NEGATIVA NA SOLDAGEM MIG.....	35
2.4.	VERSÕES DO MIG/MAG CMT	37
2.4.1.	CMT – Cold Metal Transfer	38
2.4.2.	CMT Pulse	40
2.4.3.	CMT Advanced	42
2.4.4.	CMT Advanced Pulse	43
2.4.5.	Fontes sinérgicas de soldagem	44
3.	CARACTERIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE SOLDAGEM CMT	47
3.1.	COMPARATIVO ENTRE VERSÕES DO CMT.....	51
3.1.1.	Metodologia	52
3.1.2.	Resultados e Discussões	53
4.	DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA A SOLDAGEM DE RAIZ EM LIGAS DE ALUMÍNIO NAVAL	61
4.1.	AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ARCO NA SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO	63
4.2.	PROCEDIMENTOS PARA A SOLDAGEM DE RAIZ	65
4.2.1.	Soldagem de raiz manual	65
4.2.2.	Soldagem de raiz mecanizada	67
4.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	70
4.3.1.	Cálculo de potência elétrica	70
4.3.2.	Solda de raiz	73
4.3.3.	Avaliação em termos do rendimento bruto de fusão.....	75
5.	SOLDAGEM MIG PULSADA COM ARAME ER4043	79
5.1.	PRINCÍPIOS BÁSICOS DO CONTROLE DA TRANSFERÊNCIA DE GOTAS POR CORRENTE PULSADA	79
5.2.	METODOLOGIA	81
5.3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
6.	CONCLUSÕES.....	93
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
8.	REFERÊNCIAS	97

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Apesar de ter surgido há mais de seis décadas, o processo de soldagem MIG/MAG continua a gerar sempre novas expectativas e tem sido continuamente assunto de pauta. Entretanto, as inserções tecnológicas são de grande profusão e diversidade, restando apenas a similitude das partes macro componentes. Esta abundância de inovações tem como causa a necessidade cada vez maior de se ter produtos com maior resistência e confiabilidade, além da constante busca pela redução de custos na produção. O processo MIG/MAG possui um grande potencial para o desenvolvimento de inovações. Todavia, isto só foi possível devido às invenções em vários ramos da ciência e tecnologia, as quais envolvem o controle de processos, a eletrônica de potência, a informática e os sistemas de acionamento. Em consequência, inúmeras empresas espalhadas pelo mundo lançam no mercado a cada ano um grande número de novidades, anunciando soluções e aplicações, que deixam o usuário com dificuldades de entendimento. De fato, as explicações para grande parte dos resultados obtidos não refletem adequadamente a realidade científica. As verdadeiras razões para que uma determinada tecnologia seja boa são mascaradas por frases de efeito mercadológico. Isto, para a ciência, se torna um desserviço grave e, por esta razão, os laboratórios e institutos de pesquisa devem exercer suas ações com bastante empenho.

O presente trabalho representa um contributivo para este fato, aproveitando a missão do LABSOLDA na construção de um veleiro em liga de alumínio naval. Além do desafio de utilizar na construção soldada as versões mais apropriadas do processo MIG para as diversas espessuras, tipos de juntas e diferentes posições, a expectativa é de se automatizar ao máximo as operações de soldagem.

De modo geral, a soldagem feita em estaleiros nacionais que fabricam embarcações em ligas de alumínio é realizada manualmente pelos dois lados da chapa. O soldador aplica um passe de solda de um lado e, em seguida, esmerilha o material no lado oposto para posterior deposição. Só após esse procedimento são feitos os passes de enchimento ou acabamento. A operação de esmerilhamento, além de onerar tempo de mão-de-obra, pode contaminar o metal de base com partículas do disco ou esmeril que, por sua vez, contribuem na formação de porosidades na solda. A retirada de parte do material já depositado causa também desperdício e consequente aumento de custos.

Para que a soldagem fosse realizada de maneira unilateral, ou seja, com a execução de uma solda de raiz, uma das versões do MIG em

cogitação foi a CMT. Dada às assertivas com relação ao CMT Advanced, principalmente no que diz respeito à propriedade descrita em inglês como *Bridgibility*, foi também adquirido pelo LABSOLDA um equipamento deste modelo a fim de testar esta propriedade na soldagem de raiz em juntas de topo. Como a aplicação das versões CMT só tem sentido na faixa de corrente onde a transferência metálica ocorre por curto-circuito, interessava muito o comparativo com o MIG convencional também na mesma faixa.

Em outras condições como, por exemplo, a realização de passes de enchimento ou acabamento, a soldagem com as versões CMT ou MIG Convencional pode não fornecer a energia suficiente para a execução de uma solda com boa qualidade. Por esse motivo, incursões também foram processadas numa faixa de potência onde a versão MIG pulsada era passível de ser utilizada. Por causa de várias assertivas na literatura sobre a estabilidade do processo com a proposição de índices de estabilidade, foram desenvolvidas experiências com o arame de adição ER4043 na busca de relacionamentos físicos entre as variáveis que compõem o processo. Embora não tenha sido para um arame relativo à construção do veleiro, já que não se trata de alumínio naval, o presente trabalho abriu caminho para outra dissertação de mestrado especificamente tratando das ligas navais.

O alumínio, mesmo apresentando boas características em seu estado puro, como resistência a corrosão, alta ductilidade, condutividade elétrica e térmica, em aplicações específicas como o caso do setor naval recebe elementos de liga que lhe conferem, por exemplo, uma maior resistência mecânica. Para classificar a grande quantidade de ligas de alumínio existentes, a Aluminum Association desenvolveu um sistema de classificação que, no Brasil, é representada pela norma NBR6834. Dividida em dois grupos de acordo com o processo de fabricação, a classificação das ligas é dada conforme a Tabela 1. O primeiro algarismo do código de quatro dígitos corresponde ao grupo relacionado ao elemento químico de liga com maior representatividade [1]. Devido à especificidade de aplicação de algumas ligas, não se tem a disponibilidade comercial de todas elas, sendo algumas requeridas ao fabricante somente por encomenda. Neste trabalho, as ligas utilizadas como metais de adição estão focadas nas séries 4 e 5, ou seja, ligas de Alumínio-Silício (AlSi) e Alumínio-Magnésio (AlMg) respectivamente.

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio de acordo com o principal elemento de liga

Ligas trabalhadas		Ligas Fundidas
Liga ABNT (NBR6834)	Principal Elemento Químico da Liga	Principal Elemento Químico da Liga
1XXX	Alumínio não-ligado mínimo 99% de pureza	Alumínio não-ligado mínimo 99% de pureza
2XXX	Cobre	Cobre
3XXX	Manganês	Silício com adições de cobre e/ou magnésio
4XXX	Silício	Silício
5XXX	Magnésio	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício	Série não utilizada
7XXX	Zinco	Zinco
8XXX	Outros Elementos	Estanho
9XXX	Série não utilizada	Outros Elementos

Inserido nesse contexto, o objetivo geral do trabalho é contribuir com o entendimento de questões pertinentes a soldagem MIG de ligas de alumínio, no que diz respeito à estabilidade do processo e qualidade dos resultados. Para tanto, o trabalho tem como objetivos específicos:

- Analisar a variante do processo MIG/MAG denominada de CMT e sua aplicação na soldagem de ligas de alumínio;
- Propor um procedimento de soldagem de chapas de alumínio naval da liga 5083 dispostas em junta de topo que seja realizado de maneira unilateral e automática, com o foco na formação de raiz em diferentes posições de soldagem, principalmente a vertical ascendente;
- Investigar a característica de fusão do arame de alumínio, especificamente da liga ER5183;
- Pesquisar a aplicação da variante MIG com corrente pulsada em ligas de alumínio e avaliar a relação dos parâmetros de pulsação de corrente com a qualidade do cordão e a estabilidade do processo, usando novos recursos tecnológicos como a filmagem.

1.1. ESTRUTURA DO TEXTO

O trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo esta introdução o de número 1.

O capítulo 2 aborda, em primeiro momento, os motivos que

levam a atribuição de que a soldagem de alumínio é uma operação dificultosa. Nesse capítulo ainda é citado o grande número de variantes do processo MIG/MAG de onde se destacou a tecnologia CMT. No âmbito da soldagem MIG/MAG, o CMT e suas modalidades aparecem como o que se tem de mais moderno atualmente.

Quando aplicado para a soldagem de alumínio, o CMT proporciona ótimos resultados, sendo esse o principal motivador para a escrita do capítulo 3, onde essa tecnologia é caracterizada, discutida e comparada entre suas diferentes modalidades. Cabe aqui então mencionar que o trabalho foi estruturado de forma que as comparações, análises e discussões acontecessem à medida que os resultados são apresentados.

O capítulo 4 trata da realização de procedimentos de soldagem de raiz em chapas de liga de alumínio 5083, com 6 mm de espessura dispostas em junta de topo. Foram realizadas análises comparativas entre o MIG convencional e o CMT, inclusive com a avaliação da característica de fusão do arame ER5183 para as duas versões.

No capítulo 5, são apresentados os estudos desenvolvidos sobre a variante MIG com corrente Pulsada, com a proposição de um conjunto de parâmetros de destacamento que ofereceu bons resultados em termos de estabilidade do processo e qualidade do cordão de solda.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões gerais sobre o trabalho e o capítulo 7 traz as sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICOS

A soldagem MIG de ligas de alumínio é normalmente tida como dificultosa. Na sequência são apresentados os aspectos gerais da problemática.

2.1. ASPECTOS GERAIS DA SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO

Devido às suas características físico-químicas, a soldagem MIG de alumínio exige requisitos mais minuciosos do que o MIG/MAG para aço. Embora todos os metais e ligas formem óxidos em suas superfícies, o caso do alumínio e suas ligas é particularmente especial devido à grande diferença de temperatura de fusão com seus respectivos óxidos. Constituem uma fina camada de óxido, que mesmo com espessuras muito pequenas (25-50 Å), confere ao metal uma maior resistência ao ataque de meios corrosivos [1]. Por outro lado, a formação dos referidos óxidos traz alguns inconvenientes para a soldagem.

Enquanto o ponto de fusão do alumínio é em torno de 660°C, a alumina se funde aos 2052°C. Desse modo, para tornar possível a soldagem de alumínio é necessária a remoção dessa camada de óxido. Como a polaridade usualmente aplicada no processo MIG/MAG é do positivo da fonte sobre o arame, isso não chega a ser um problema na soldagem MIG de alumínio. Nessa polaridade acontece o efeito de limpeza catódica, onde o próprio arco elétrico se encarrega da remoção dos óxidos. Por ter uma maior facilidade de emissão de elétrons do que os metais puros, a alta concentração de calor que é gerada nos óxidos acaba por eliminá-lo [2]. O gás de proteção evita uma nova oxidação, garantindo uma superfície limpa para a execução da soldagem.

Os efeitos relacionados às características térmicas do alumínio trazem problemas como a formação de trincas e a variação da geometria do cordão ao longo da solda. Segundo Silva [3], por ter um coeficiente de expansão térmica cerca de duas vezes maior que o aço, o alumínio está sujeito a maiores níveis de deformação. Essa deformação exige um sistema de fixação mais rígido e com isso, o surgimento de tensões residuais pode causar trincas, prejudicando a continuidade do cordão.

A alta condutividade térmica promove cordões com baixa molhabilidade e penetração em seu início, onde o calor do arco é rapidamente distribuído pelo material de base, dificultando a formação da poça metálica. Porém, à medida que a solda avança, o metal de base continua recebendo calor do arco, o que proporciona o aumento da penetração e molhabilidade, até o nível extremo onde a geometria do

cordão torna-se inadequada, exigindo a interrupção do processo. Essa variação do cordão pode inviabilizar a soldagem em muitas situações, e por esse motivo é necessário o controle sobre a quantidade de energia imposta à peça.

Outro problema que é comumente encontrado nas soldagens MIG de ligas de alumínio é a formação de poros. Pelo fato do alumínio ter uma alta condutividade térmica, sua solidificação acontece de forma bastante rápida. Os gases aprisionados na poça de fusão não alcançam a superfície a tempo, o que dá origem aos poros. A problemática é normalmente mais acentuada nas posições diferentes da plana. A literatura [1,4] cita o hidrogênio como a causa principal para a porosidade no alumínio, principalmente por ter sua solubilidade aumentada em quase vinte vezes na transição do estado sólido para o líquido. Ressalta-se aqui que pela alta taxa de solidificação do alumínio, não somente o hidrogênio, mas qualquer gás pode acabar ficando aprisionado no cordão solidificado. A limpeza inadequada da peça é o contribuinte mais expressivo no mecanismo de formação de porosidade. Segundo Tuttle [4], a presença de água e óleo sobre a peça funciona como uma fonte de hidrogênio, que é solubilizado na poça de fusão. Por isso a necessidade da aplicação de corretas técnicas de limpeza e preparação do metal de base antes da soldagem. Outros motivos podem ser: contaminação por meio do metal de adição (tanto na superfície quanto na composição), presença de hidrogênio ou vapor de água no gás de proteção ou por perturbações na atmosfera gasosa protetora.

A alimentação de arame de alumínio pode apresentar problemas devido à sua baixa resistência mecânica, podendo vir a dobrar ou enrolar dentro do conduíte da tocha ou no mecanismo de tração. Em tochas de comprimento maiores pode ser utilizado o sistema do tipo push-pull, onde além do alimentador empurrar o arame, um conjunto de motor com roletes anexado a tocha puxa o mesmo, reduzindo o risco de enrolar o arame, como também, garantindo a manutenção da taxa de alimentação.

2.2. VARIANTES DO PROCESSO MIG/MAG

Os avanços tecnológicos e o domínio sobre a eletrônica de potência aplicada nas fontes de soldagem possibilita aos fabricantes e pesquisadores atuar de uma maneira muito ampla sobre os parâmetros de soldagem. O controle que a fonte exerce sobre as formas de onda de corrente e ou tensão podem ser cruciais no resultado da soldagem. Esses avanços possibilitam a criação de métodos de controle destinados a

aplicações específicas. Dessa forma, o processo de soldagem MIG/MAG ganha cada vez mais variantes que possibilitam resultados antes não alcançados com os modos convencionais. Por outro lado, como mínimos detalhes na forma de controle podem fazer a diferença no sucesso ou insucesso da soldagem, os fabricantes lançam cada vez mais novos modos de operação com promessas de solucionar os problemas e dificuldades encontradas em situações específicas na soldagem.

Durante muito tempo o processo MIG/MAG foi utilizado com fontes comandadas em tensão, já que era a maneira possível para que o processo funcionasse na faixa onde a transferência metálica ocorre por curto-circuito. Nesta faixa de operação e para as fontes de soldagem convencionais, o arco não tem condições de permanecer aceso continuamente, uma vez que a velocidade de fusão não é suficiente para evitar o contato físico do eletrodo com a peça. Neste caso, a corrente não pode permanecer fixa, pois, do contrário, a gota metálica formada no extremo do eletrodo não se destaca, fazendo com que o eletrodo adira à peça e o arco não tenha condições de reacender. Desse modo, nos sistemas convencionais, a corrente tem de estar livre para variar a fim de que a cada curto-circuito o arco possa se restabelecer, propiciando a continuidade do processo. A Figura 1 ilustra, para uma velocidade de arame (V_a) de 6 m/min, como as variáveis, tensão, corrente e potência do arco se comportam. Nestes sistemas, apenas a dinâmica com que a corrente varia pode ser regulada. Esta regulação é, nas fontes de soldagem, conhecida por indutância. Para se obter um melhor resultado na solda, a regulação da indutância deve ser adequada às várias combinações de variáveis de soldagem, como é tratado em vários trabalhos [5,6]. Mesmo com estas regulagens, o sistema é baseado no fato que a corrente se adapta às circunstâncias dos fenômenos e é a isto que se denomina de auto-adaptação ou de “Controle Interno”.

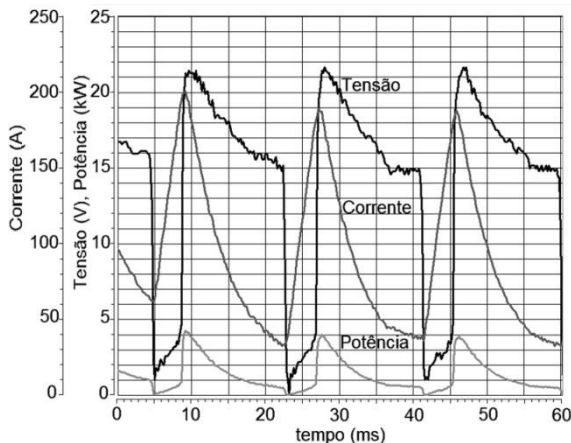


Figura 1 – Oscilogramas de tensão, corrente e potência para o modo MIG convencional, arame ER5183 com $\varnothing = 1,2$ mm, $V_a = 6$ m/min

Se a fonte fosse de corrente constante, quando houvesse o curto-circuito e consequente extinção do arco, não haveriam as condições físicas adequadas para a sua reabertura. A gota no extremo do eletrodo teria dificuldade de ser expelida e o arame, continuando sendo alimentado, não ofereceria condições para o ressurgimento do arco. Entretanto, há que se fazer menção aqui ao sistema de controle desenvolvido certo tempo depois [7,8], que tinha o objetivo de controlar a velocidade do arame-eletrodo por meio da monitoração da tensão de soldagem. Este sistema é denominado de controle externo, numa tentativa de diferenciar do sistema convencional com fonte de tensão constante (controle interno). Entretanto, o controle externo só funcionava razoavelmente quando a faixa de transferência metálica não era a de curto-circuito. A simples parada do arame no ato do curto-circuito, sem que houvesse um aumento da corrente para expelir a gota e reabrir o arco, não produzia continuidade ao processo, principalmente em posições diferentes da plana.

Toda esta problemática citada é alterada com o advento dos sistemas em malha fechada com o objetivo de controlar a corrente. Estas novas tecnologias de fontes de soldagem não são mais de comando em tensão (tensão constante), mas sim, são comandadas em corrente (em alguns casos, um misto de corrente e tensão). Isto significa que o comportamento da corrente no evento do curto-circuito é devidamente controlado a partir do monitoramento do arco e da poça de fusão. Trata-se, em princípio, de uma corrente pulsada, embora não seja assim

denominada porque está convencionado que o termo pulsado no processo MIG/MAG fica restrito ao caso da transferência metálica sem curto-circuito. A versão CMT (Cold Metal Transfer) do processo MIG/MAG, além de controlar a forma da onda da corrente, controla a velocidade e sentido de avanço do arame (de acordo com a frequência de transferência, por intermédio de um motor posicionado na tocha) e, de maneira análoga ao que se tem no sistema convencional do denominado controle externo, a velocidade do arame no cabeçote alimentador. Entretanto, a dinâmica da corrente, da tensão e da potência, conforme oscilogramas da Figura 2, para uma situação de velocidade de arame idêntica ao do MIG convencional (Figura 1), mostra claramente fases muito mais distintas. A tensão no curto-circuito permanece em um patamar muito baixo durante toda esta fase, que é de cerca de 10 ms, ao mesmo tempo em que a corrente também permanece em praticamente 30 A durante toda a referida fase. Em consequência, a potência elétrica na mesma é extremamente baixa e constante. Quando o arco reacende, a corrente, após um pequeno tempo em valor baixo, é controlada em um patamar praticamente constante e relativamente alto em aproximadamente 68% do período total. A tensão assume também valores altos que não são substancialmente diferentes dentro do referido tempo. Isto conduz a uma potência resultante consideravelmente alta e praticamente constante, que oferece condições de formar uma gota de maneira muito rápida. Esta combinação de potência alta e baixa com a associação do retrocesso do arame propicia uma transferência de gota metálica por tensão superficial de maneira muito suave, estável e regular [9,10]. Essa tecnologia também se mostra eficaz na redução de respingos.

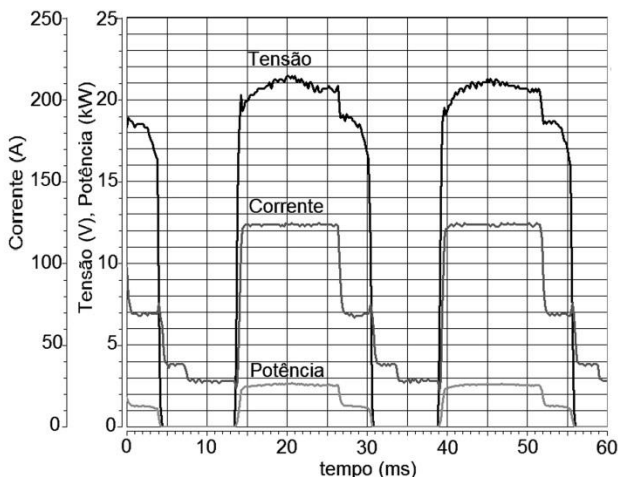


Figura 2 – Oscilogramas de tensão, corrente e potência para o modo CMT, arame ER5183 com $\varnothing = 1,2$ mm, $V_a = 6$ m/min

Para operar na faixa de transferência por curto-circuito, o processo MIG/MAG convencional requer baixos níveis de tensão, o que implica em uma relação potência/velocidade de arame também baixa. Isto não é um problema grave na soldagem de aço carbono em geral, mas se torna crítico na soldagem de inoxidáveis e na soldagem de alumínio e suas ligas. Por este motivo foi desenvolvida a tecnologia da corrente pulsada, a qual nada mais é do que uma antecipação da elevação da corrente, antes que o curto-circuito aconteça e a tensão caia a níveis muito baixos. Nas primeiras fontes de energia lançadas no mercado com esta filosofia, esta elevação da corrente não era diretamente regulada, mas sim por intermédio da elevação da tensão. Então, de fato, as fontes de energia eram comandadas em tensão com a possibilidade de pulsação da mesma. Além disso, a frequência de pulsação não era livremente regulada, mas sim igual à frequência da rede de fornecimento de energia ou aos seus múltiplos e submúltiplos. Esta maneira de produzir pulsação nunca alcançou êxito prático. Foi somente com o advento das fontes de controle da corrente que o processo pulsado atingiu seus propósitos. Entretanto, após já mais de três décadas de utilização, o desenho da onda pulsada é ainda distinto de fabricante para fabricante. Permanecem ainda controvérsias sobre qual conjunto de variáveis é o mais adequado e, no caso da soldagem de ligas de alumínio, é onde isto se acentua mais fortemente. Muito se comenta sobre estabilidade do processo sem que haja um entendimento adequado

sobre seu significado prático.

Sobre a sua base de funcionamento, apesar de algumas elucubrações sem sentido prático, é quase universalmente aceito que o adequado funcionamento da tecnologia de controle da transferência por corrente pulsada tem como pilar o destacamento de uma gota por período. Entretanto, permanece até hoje algumas dúvidas resultantes de discussões de vários pesquisadores e que algumas vezes são conflitantes entre alguns. Uma das questões se refere ao momento em que as gotas devem ser expelidas a fim de que seja obtida a melhor estabilidade do processo. Uma segunda questão discutida é a relação otimizada entre o valor da corrente de pulso e o seu respectivo tempo de duração. Em terceiro lugar viria a questão de qual seria o melhor diâmetro de gota, o que implica na frequência da transferência metálica, e se este diâmetro de gota deve ter correlação com a corrente de pulso e o seu tempo de duração. Por último vem a questão da estabilidade do comprimento do arco, fato que na soldagem de ligas de alumínio é revestido de tão alta importância, uma vez que oferecem muito maior dificuldade do que as ligas de aço. Esta é uma das razões para o surgimento de fontes de soldagem com as chamados controles adaptativos.

Pesquisadores, a exemplo de Gosh et al [11,12], propõem índices de estabilidade que são muito mais uma aplicação matemática do que de fato uma interpretação física dos fenômenos. Nesse caso em particular, a proposta seria por um fator adimensional chamado por φ , calculado pela equação 1. O autor sugere o uso desse índice no auxílio da escolha dos corretos parâmetros de pulso para a soldagem MIG pulsada. De modo geral, as conclusões apresentadas indicam que os melhores resultados são obtidos quanto menor for o valor de φ . Essa colocação é contestada nos ensaios apresentados no capítulo 5.

$$\varphi = \left(\frac{I_b}{I_p} \right) \cdot f \cdot t_b \quad (1)$$

2.3. O USO DA POLARIDADE NEGATIVA NA SOLDAGEM MIG

Por muitos anos o uso da polaridade negativa aplicada ao eletrodo consumível na soldagem MIG foi algo impraticável e até mesmo considerado impossível. Quando o arame está conectado ao positivo da

fonte, o arco fica ancorado na extremidade do arame, envolvendo somente a gota metálica em formação, o que acaba contribuindo para o destacamento. Por outro lado, na polaridade negativa, o arco assume um comportamento que dificulta o processo de transferência metálica. Quando o arame está conectado ao negativo da fonte, o arco elétrico escala sobre o arame buscando pontos onde é emissão de elétrons é favorecida pela presença de óxidos [13]. Esse efeito (Figura 3) elimina a concentração de forças de constrictão causadoras do efeito pinch, provocando a formação de gotas de grande diâmetro (em comparação ao diâmetro do arame) que são influenciadas pelo surgimento de forças repulsivas. Além disso, com maior parte do calor do arco sendo aportado ao próprio eletrodo, o cordão de solda resultante apresenta pouca penetração e baixa molhabilidade.

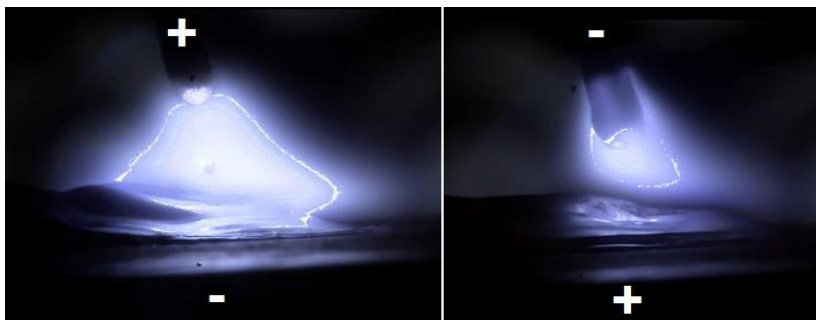


Figura 3 – Comportamento do arco MIG nas polaridades positiva e negativa, CMT Advanced, arame ER4043 1,2mm

De certa forma, a baixa penetração é um requisito desejado quando a aplicação se trata, por exemplo, da soldagem de chapas finas. A escalada do arco no arame contribui ainda para um aumento na taxa de fusão. Em outras palavras, utilizando a polaridade negativa é possível fundir mais arame do que na polaridade positiva com um mesmo nível de corrente aplicado. Esse fato faz com que o uso da polaridade negativa seja uma opção na soldagem de juntas de chapas finas com grande espaçamento (ou gap) entre elas. Essa capacidade de preenchimento é citada por alguns fabricantes como “*bridgibility*”. Nessas condições é que se insere o uso do MIG AC ou de novas variantes como o CMT Advanced.

2.4. VERSÕES DO MIG/MAG CMT

Lançado pela FRONIUS no ano de 2004, o chamado Cold Metal Transfer – CMT, com a tradução “Transferência Metálica Fria”, surgiu como uma solução para soldagem de chapas finas e união de aço com alumínio. O principal diferencial dessa versão do processo MIG/MAG é a adição do movimento de recuo do arame para realizar o destacamento da gota (Figura 4). Esse movimento do arame juntamente com o controle de corrente proporcionou ao CMT uma transferência metálica muito suave, com praticamente nenhum respingo e pouca geração de fumos. Isso só foi possível devido à alta resposta dinâmica do motor tracionador de arame posicionado na tocha, que pode apresentar frequências de até 70 Hz na movimentação do arame [14]. O sistema de alimentação de arame é composto por dois motores, um em cada extremidade da mangueira de condução do arame, ou seja, na tocha e no próprio cabeçote alimentador. Interceptando a mangueira está instalado um dispositivo chamado de buffer ou pulmão, como pode ser visto na Figura 5. O buffer é responsável por disponibilizar a quantidade de arame instantaneamente requerida pelo motor da tocha, absorvendo o movimento de recuo do arame. Em uma visão simplificada o motor do cabeçote fornece a média da velocidade de arame para o buffer, sendo que o motor da tocha, responsável pelo movimento de avanço e recuo de arame é suprido pelo arame do buffer. Esse assunto é discutido em mais detalhes no capítulo 3.

Essa versão do processo MIG/MAG tem-se mostrado cada vez mais versátil, com diversas aplicações para diferentes materiais, desde soldagem de união de chapas finas [15], passando por revestimentos [10,16], passe de raiz [17,18] e união de materiais dissimilares, como por exemplo, o alumínio com o aço [19,20,21]. O CMT apresenta ainda variações que podem acrescentar períodos de pulsação de corrente, quando é chamado de CMT PULSE, ou então utilizar a inversão de polaridade nos chamados CMT Advanced e CMT Advanced Pulse.

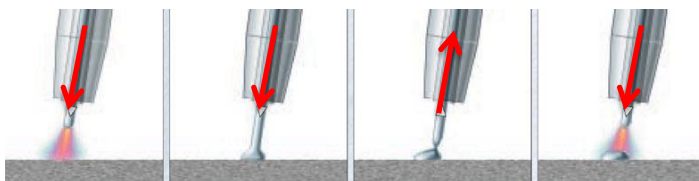


Figura 4 – Movimento de avanço e recuo do arame na variante CMT [22]

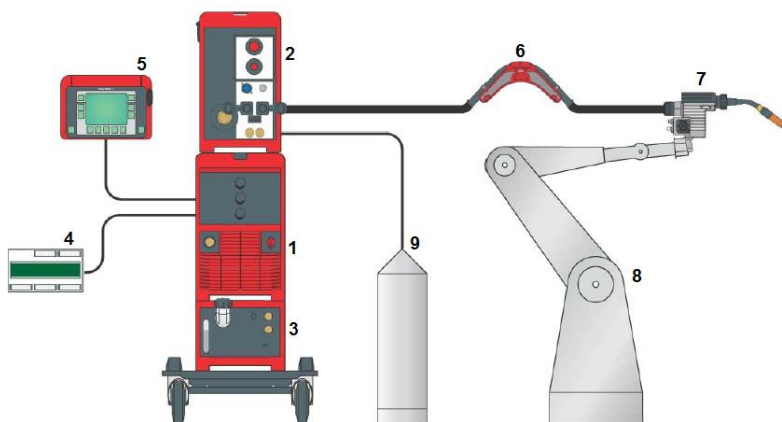


Figura 5 – Disposição de componentes básicos de um sistema CMT. 1 – Fonte de Alimentação; 2 – Cabeçote alimentador; 3 – Refrigeração; 4 – Interface para Robô; 5 – Unidade de Controle Remoto (RCU 5000i); 6 – Buffer de arame; 7 – Tocha; 8 – Dispositivo manipulador (Robô); 9 – Gás de proteção [22]

2.4.1. CMT – Cold Metal Transfer

A transferência metálica é dada fundamentalmente por curto-circuito com o controle de corrente imposto pela fonte. De acordo com informações do fabricante [23], os parâmetros velocidade de arame (na tocha), corrente e tensão se comportam de acordo com as curvas características colocadas na Figura 6. Os números entre parênteses representam os parâmetros que permitem regulagem. A descrição do funcionamento pode ser acompanhada pela sequência de imagens e pelo oscilograma de tensão e corrente mostrado na Figura 7. O ponto “a” corresponde à fase em que um pulso de corrente fornece a energia necessária para a formação de uma gota metálica na extremidade do arame eletrodo. A corrente é então reduzida em “b” de tal forma que, com a continuidade do avanço do arame, o curto-circuito ocorra com níveis baixos de corrente, evitando a formação de respingos e a vaporização metálica. O ponto “c” é o momento imediatamente anterior ao instante de detecção do curto-circuito, quando a tensão cai a zero, sendo marcado pelo ponto “d”. Nesse momento, além da corrente ser mantida em valores baixos, acontece a desaceleração do arame que

continua avançando até o ponto “e”. O material líquido se acomoda à poça de fusão e o arame inicia o movimento de recuo. Em “f” é possível ver a constrição da ponte metálica, instantes antes da abertura do arco. Diferentemente do curto-circuito convencional, onde a constrição acontece sob a ação de forças eletromagnéticas, no CMT esse evento é dado predominantemente pela ação de recuo do arame, contribuindo para que a transferência metálica aconteça de forma muito suave. Durante a abertura do arco a corrente é mantida em um baixo valor, como indicado pelo baixo índice de luminosidade na imagem correspondente ao ponto “g”. Ainda sob esse ponto, acontece a desaceleração do movimento do arame, que continua recuando até “h”. Nesse momento a fonte já está impondo um novo pulso de corrente, repetindo o ciclo com a formação de uma nova gota.

O CMT, como o próprio nome sugere, é normalmente associado a um processo frio, o que em soldagem é de certa forma muito relativo. De modo geral, os trabalhos publicados na área de soldagem que citam o emprego do CMT utilizam a informação de que essa variante MIG produz uma solda mais fria como justificativa para suas conclusões. Analisando os oscilogramas de tensão e corrente (Figura 7) é possível verificar que, no momento que acontece o curto, a tensão cai a praticamente zero e permanece nesse patamar até a reabertura do arco. Durante esse período, a potência elétrica fornecida ao sistema é muito baixa. Enquanto isso, no período de arco aberto, a fonte tem que fornecer energia suficiente para a formação da gota metálica, mantendo a corrente em patamares bem definidos. Bruckner [19] cita que o CMT pode ser bem caracterizado como sendo intercalações de quente e frio e coloca ainda que essa alternância causa o efeito de redução na pressão do arco. A baixa pressão de arco do CMT foi a justificativa utilizada por Kim [17] para a formação insuficiente de raiz em juntas de topo com condições de gap muito pequenos.

Picking e Young [24] mencionam uma comparação entre o CMT e o modo MIG pulsado Sinérgico na soldagem de alumínio, de onde tiram a conclusão que, entre eles, o CMT fornece um menor aporte térmico com uma maior taxa de fusão. De acordo com Picking et al [10], uma das características do CMT é a facilidade de controlar o aporte térmico devido à variação do tempo de curto-circuito. Esse tempo pode ser regulado por um parâmetro que o fabricante chama de correção de altura de arco.

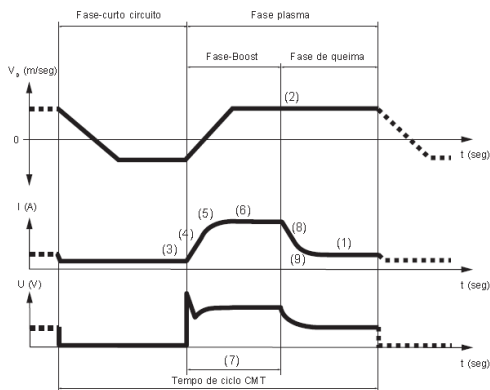


Figura 6 – Visão geral das curvas características do modo CMT [23]

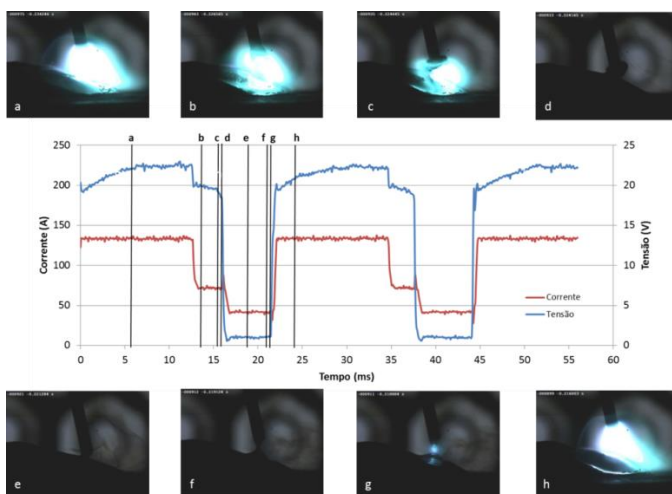


Figura 7 – Oscilogramas de tensão, corrente para o modo CMT, soldagem de alumínio ER5183

2.4.2. CMT Pulse

A variação do CMT denominada CMT Pulse é caracterizada por ciclos de pulsação de corrente, onde a transferência metálica acontece por voo livre, intercalados com ciclos de CMT, com transferência por curtos-circuitos e atuação no recuo do arame. Em outras palavras, o CMT Pulse se trata de uma combinação do CMT com o MIG Pulsado.

Picking e Young [24] citam que, por operar na faixa de corrente da transferência por curto-circuito, o CMT está restrito a soldagem de chapas finas e a imposição de altos valores de corrente durante a fase de arco pode resultar no destacamento descontrolado de gotas por ação do efeito pinch (item 3.1.2). Por isso, a introdução de pulsos de corrente entra como uma solução, oferecendo o controle sobre o destacamento de gotas, possibilitando a aplicação de maiores valores de corrente média e de maiores potências, permitindo assim a soldagem de chapas mais espessas. A Figura 8 traz as curvas características para o CMT Pulse. Nela é possível distinguir a fase de pulsação de corrente, onde se teria uma velocidade de arame constante e também os ciclos de CMT, com o movimento de avanço e recuo. O sistema permite que o operador regule o número de eventos consecutivos de CMT e também a quantidade de pulsos de corrente.

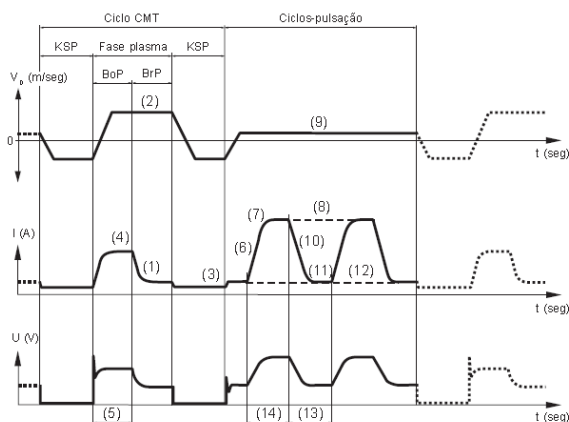


Figura 8 – Visão geral das curvas características do modo CMT Pulse [23]

Segundo o fabricante [22], a inserção dos pulsos proporciona um melhor controle no fornecimento de calor, na geometria do cordão, penetração e aumento na velocidade de soldagem. De fato, o que se observa é que a adição de pulsos de corrente dá a possibilidade de se obter maiores níveis de potência do arco para uma mesma velocidade de arame. Picking e Young [24] mencionam que a penetração pode ser controlada pela variação do número de pulsos e pelo valor da corrente de pico. Assim como no CMT, em se mantendo constante o número de pulsos, a variação no tempo de curto-circuito também influencia na

penetração. Segundo esses pesquisadores, o aumento no tempo de curto diminui o aporte térmico à peça e, por consequência, reduz a penetração.

2.4.3. CMT Advanced

Se o CMT é considerado por muitos como uma soldagem fria, o CMT Advanced, apresentado pelo fabricante no ano de 2009, amplia ainda mais esse horizonte. O resultado é consequência da combinação entre o movimento de recuo do arame com a inversão da polaridade da corrente de soldagem. O uso da polaridade negativa proporciona o aumento na taxa de fusão do arame e a redução no aporte térmico sobre o material de base, promovendo assim a união de chapas muito finas ou de juntas com maiores espaçamentos, incluindo variações na abertura. Em aplicações de revestimento, o CMT Advanced produz uma menor taxa de diluição [25].

Uma das dificuldades encontradas por sistemas de soldagem MIG AC é o momento de inversão da polaridade. No MIG AC, onde a transferência metálica ocorre sem a existência de curtos-circuitos, a inversão de polaridade com o arco aceso ocasiona muita flutuação, instabilidade e até a extinção do arco [13,26]. O CMT Advanced faz uso do momento de curto-circuito para realizar a inversão da polaridade, aproveitando a inexistência do arco. Com isso, é possível ser obtida a mesma estabilidade e o baixo nível de respingos e fumos que o CMT original [27]. Na Figura 9 é colocada a curva característica do CMT Advanced, que mostra, de maneira ilustrativa, um evento de transição entre o positivo e o negativo.

O operador pode selecionar o número de eventos consecutivos das polaridades positiva e negativa. O período positivo é determinante na penetração do cordão e no efeito de limpeza catódica. O período negativo aumenta consideravelmente a taxa de fusão, o que significa que, para os mesmos níveis de energia, o uso de polaridade negativa implica em maior fusão do arame [25].

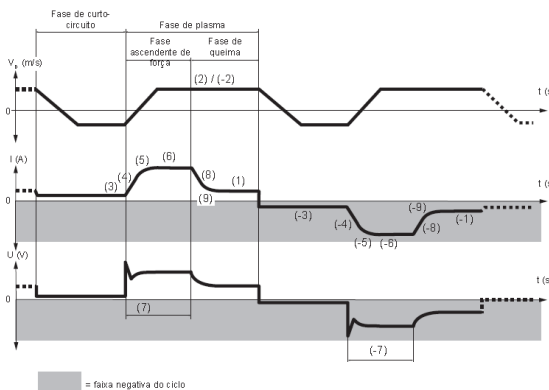


Figura 9 – Visão geral das curvas características do modo CMT Advanced [23]

2.4.4. CMT Advanced Pulse

O CMT Advanced Pulse consiste na combinação de ciclos de CMT na polaridade negativa com ciclos de pulsação de Corrente na polaridade positiva (que poderia ser comparado a um MIG Pulsado). Durante a fase negativa a transferência metálica é dada por curto circuito, com a atuação no retrocesso do arame. Durante a fase positiva, os pulsos de corrente provocam o destacamento de gotas por efeito pinch, acontecendo a transferência metálica por voo livre. A Figura 10 traz as curvas características para o CMT Advanced Pulse. Do mesmo modo que no CMT Pulse, é possível distinguir a fase de pulsação de corrente, com uma velocidade de arame constante, dos ciclos de CMT, com o movimento de avanço e recuo. O sistema permite que o operador regule tanto o número de eventos consecutivos de CMT na polaridade negativa como também a quantidade de pulsos de corrente na polaridade positiva.

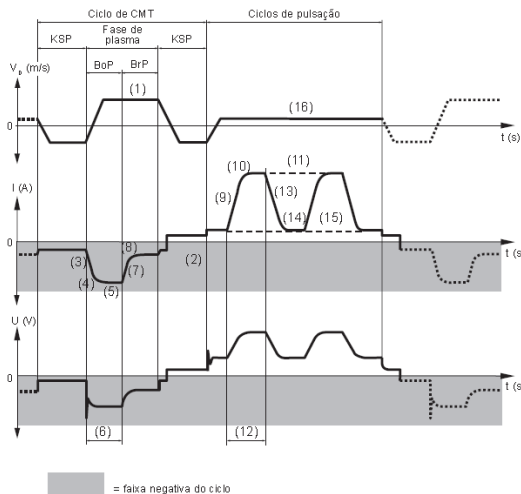


Figura 10 – Visão geral das curvas características do modo CMT Advanced PULSE [23]

2.4.5. Fontes sinérgicas de soldagem

O sucesso na realização de um procedimento de soldagem depende, entre os muitos fatores, da escolha dos corretos parâmetros de soldagem. Nas fontes de soldagem MIG/MAG convencionais o operador regula os valores de tensão, velocidade de arame e a indutância. O desenvolvimento de sistemas controlados em corrente, como por exemplo, o MIG pulsado, aumenta consideravelmente o número de variáveis de entrada, tornando a regulagem de parâmetros uma tarefa cada vez mais complexa. Por esse motivo, grande parte dos modelos comerciais de fontes de soldagem disponibiliza uma lista de programas pré-configurados para cada tipo de material de adição e gás de proteção. É o chamado modo sinérgico, que simplifica a regulagem de parâmetros pelo operador.

A fonte de soldagem da FRONIUS funciona dessa forma. Selecionando na fonte o tipo do material de adição, o diâmetro do arame e o gás de proteção, o operador é informado das modalidades de programas de soldagem MIG/MAG disponíveis. Concluída a seleção do programa, a regulagem é feita por meio de um único parâmetro de entrada, por exemplo, a velocidade de arame. Todos os outros parâmetros necessários para a aplicação do programa escolhido são

selecionados automaticamente. Entretanto, o operador acaba ficando restrito aos parâmetros selecionados pela fonte que, para aplicações específicas, podem não oferecer a condição desejada. Por isso, a FRONIUS disponibiliza em seu equipamento duas variáveis com características de correção, sendo que a maneira de atuação dessas variáveis é dependente do modo de operação da fonte e do tipo de material escolhido. Mesmo assim, se os parâmetros de correção não atenderem a necessidade, é possível editar a chamada curva característica do material, onde o operador tem acesso aos parâmetros indicados por números nas figuras 6, 8, 9 e 10.

3. CARACTERIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE SOLDAGEM CMT

O que diferencia o CMT das outras variantes do processo MIG/MAG é, principalmente, a inserção do movimento de recuo do arame feito pelo motor localizado no corpo da tocha. Além das vantagens já citadas, essa interação mecânica do arame com a poça de fusão confere ao CMT uma alta capacidade de controlar a altura média do arco, independentemente da leitura do sinal de tensão do processo.

No processo MIG/MAG, as variações no comprimento do arco podem causar alterações nos níveis de penetração, na transferência metálica e na própria estabilidade do processo [26]. Isso faz com que sejam buscados meios para monitorar e controlar essas variações. A tensão é o parâmetro que melhor representa o comprimento do arco e mesmo assim é necessário tomar alguns cuidados quanto seu uso, como por exemplo, no MIG/MAG pulsado, avaliar se o momento mais adequado para a leitura de tensão seria durante o pulso ou a base da corrente [28,29]. Além disso, a presença de óxidos, impurezas e sujeira provocam flutuações no sinal de tensão, podendo acarretar em problemas para o sistema de controle. Kazmaier [27] mostra um exemplo por meio da Figura 11. Nesta figura, o sinal de tensão sofre uma variação devido à remoção da camada de óxidos, onde é possível verificar diferentes níveis de tensão para um mesmo comprimento de arco.

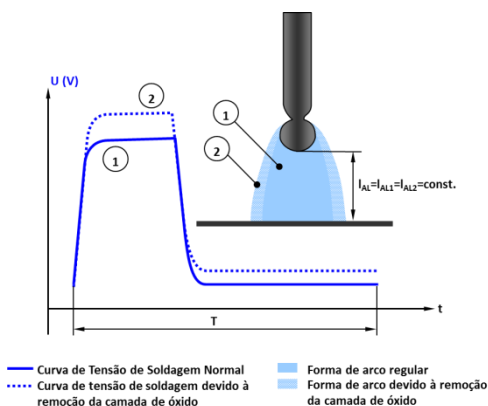


Figura 11 – Variação dos níveis de tensão devido à remoção da camada de óxido [27]

Kazmaier cita também que a principal vantagem do CMT no que diz respeito ao controle do comprimento do arco está na possibilidade de se ter uma referência de altura pelo contato do arame com a peça. A Figura 12 representa um evento de transferência metálica para o CMT Advanced. No ponto marcado pelo número 1 está indicado o instante de acontecimento do curto-circuito, onde a tensão assume níveis próximos a zero e o arame começa a desacelerar, parando de avançar sobre a peça no ponto 2. Desse momento até o ponto 3, o arame começa a acelerar no sentido de afastamento da peça, assumindo a velocidade de recuo programada a partir do ponto 3. O momento de abertura do arco, ponto 4, marca o início do controle da altura. A partir desse ponto, a fonte estabelece uma relação constante de área na curva de velocidade por tempo. Em outras palavras, após a abertura do arco no ponto 4, a fonte puxa a mesma quantidade de arame considerando sua desaceleração e parada no ponto 5, onde se tem o momento de maior comprimento do arco. Essa metodologia de controle faz com que a correção na altura do arco aconteça de forma independente dos valores de tensão no arco, que estão sujeitos às variações apresentadas anteriormente.

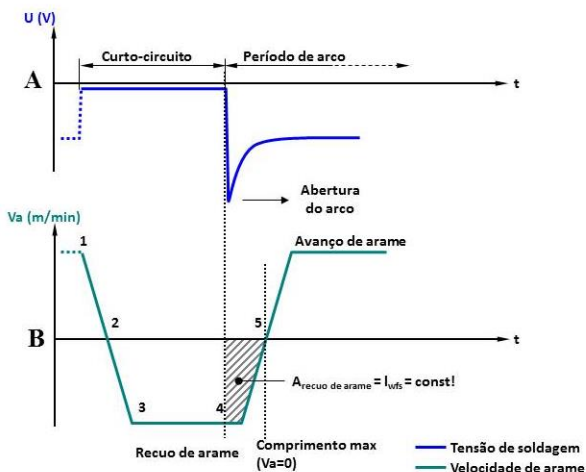


Figura 12 – Metodologia de controle do comprimento do arco para o CMT [27]

A velocidade resultante da movimentação do arame na tocha tem que ser compatível com a velocidade de avanço do arame no cabeçote alimentador. Caso contrário, o buffer de arame indicará excesso ou falta

de arame, gerando um código de erro e travando o sistema. Por esse motivo, a velocidade de avanço no cabeçote alimentador também é controlada nos modos CMT. Os resultados de ensaios preliminares revelaram esse controle da fonte sobre a velocidade de arame, como pode ser visto na Figura 13 onde é comparada a medição realizada no modo CMT com uma medição no modo Standard (como é chamado um modo convencional na fonte FRONIUS), ambos para um simples depósito sobre chapa.

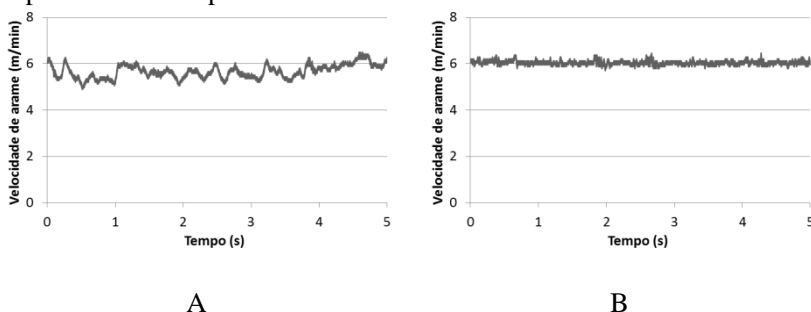


Figura 13 – Comparativo de oscilogramas de velocidade de arame

A – Modo CMT com V_a média = 5,7 m/min;

B – Modo Standard com V_a média = 6,0 m/min

De forma a evidenciar o controle na velocidade de arame do cabeçote durante o modo CMT foram realizados alguns ensaios variando bruscamente a altura da tocha. Em primeiro momento o ensaio seguiu a metodologia utilizada por Silva [30] onde foi programada uma trajetória em que o robô manipulador alterava a altura da tocha intercalando em patamares como mostrado na Figura 14A. Entretanto, devido à alta dinâmica de correção da fonte, a atuação na velocidade de arame ficou imperceptível para situações de variação lenta na altura. Por esse motivo foi realizado um movimento com variação mais brusca. Essa trajetória foi configurada como um tecimento, de maneira que o sentido não acontecesse de forma transversal ao cordão de solda e sim aproximando e afastando da peça, de acordo com a Figura 14B. A DBCP inicial foi regulada em 15 mm com amplitude de tecimento de 6 mm, o que resultou em uma variação de 12 a 18 mm. A velocidade de soldagem utilizada foi de 8,34 mm/s (50 cm/min), para uma corrente regulada na fonte em 100 A. Com esse ensaio foi possível verificar que o cabeçote respondeu na mesma frequência aplicada pelo movimento de tecimento. A Figura 15 mostra o sinal de velocidade de arame obtido para os tecimentos de 2 Hz e 4 Hz.

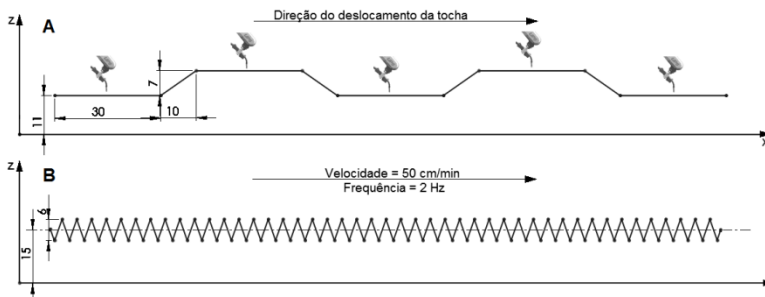


Figura 14– Esquema de movimentação da tocha com variação de altura. A – Variação lenta de altura (adaptado de [30]); B – Variação brusca de altura em 2 Hz e $v = 50$ cm/min

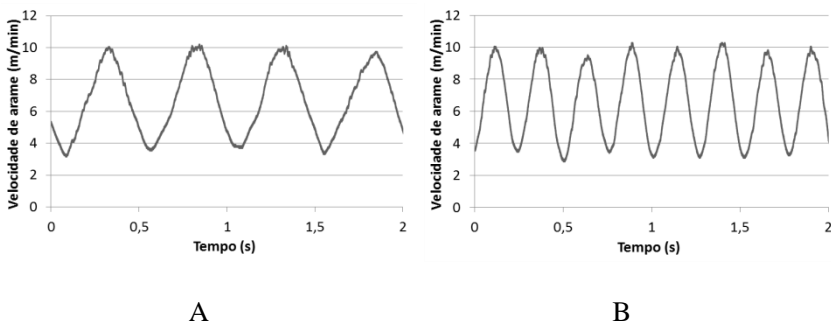


Figura 15 – Resposta na velocidade de arame. A – movimento de tecimento em 2 Hz; B – movimento de tecimento em 4 Hz

Observando os oscilogramas de tensão e corrente (Figura 16) verifica-se que o movimento de sobe e desce da tocha provoca alterações nos tempos de curto-circuito. Quando a tocha está afastando, a velocidade de recuo do arame produzida pelo motor da tocha é somada ao movimento de afastamento da tocha, o que acaba provocando uma redução no tempo de curto-circuito. Em outras palavras, o arame tem que avançar mais para depositar o material, pois a tocha está afastando. Com isso, é necessário que o cabeçote alimentador forneça uma maior quantidade de arame, compensando a diferença nas velocidades. Quando a tocha está aproximando ocorre o inverso, ou seja, há uma tendência de aumentar o tempo de curto-circuito. O motor da tocha tem de puxar mais o arame, descontando a aproximação da tocha uma vez que o valor resultante seria a diferença das duas velocidades. Dessa forma, o

cabeçote alimentador de arame tem de reduzir a velocidade de arame, evitando a sobra no buffer.

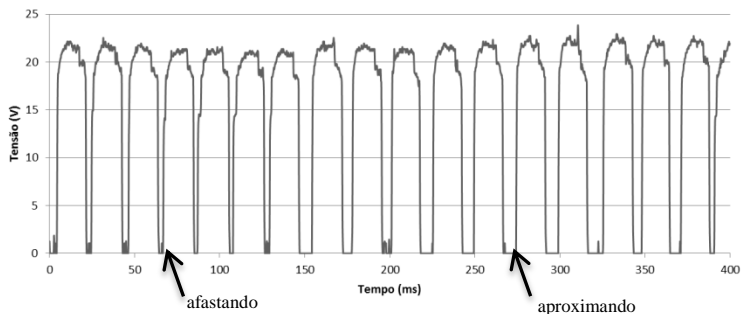


Figura 16 – Diferença nos tempos de curto-circuito em condição de extrema variação na altura da tocha no modo CMT

3.1. COMPARATIVO ENTRE VERSÕES DO CMT

Quando são analisadas as diferentes versões do CMT observa-se que cada uma delas possui particularidades que validam ou reprovam sua aplicação. Kazmaier [27] cita como vantagens do CMT a alta estabilidade do processo, o baixo nível de respingos e o baixo aporte térmico. Com a introdução da inversão de polaridade associada à movimentação do arame, as versões Advanced, além apresentarem as características do CMT convencional, possibilitam um menor aporte térmico com regulação mais flexível. Segundo esse autor, essa flexibilidade permite um melhor controle no tamanho da poça e ainda a execução de passes de raiz sem o uso de cobre juntas. Além disso, o aumento da taxa de fusão permite aumentar a capacidade “gap bridging”. Kazmaier apresenta ainda uma sequência de gráficos comparativos (Figura 17) que relacionam velocidade de alimentação de arame com corrente e tensão média para as quatro versões do CMT e para o MIG/MAG Pulsado. No gráfico é possível observar a maior taxa de fusão do CMT Advanced Pulse em relação às demais versões.

A flexibilidade na regulação do aporte térmico é resultante da possibilidade de variação no número de ciclos consecutivos nas duas polaridades. Na Figura 18 são mostradas as curvas de potência por velocidade de arame para as duas configurações de eletrodo (positivo e negativo). A área marcada entre as curvas representa os diferentes níveis de energia que podem ser regulados conforme a combinação dos ciclos em positivo e em negativo.

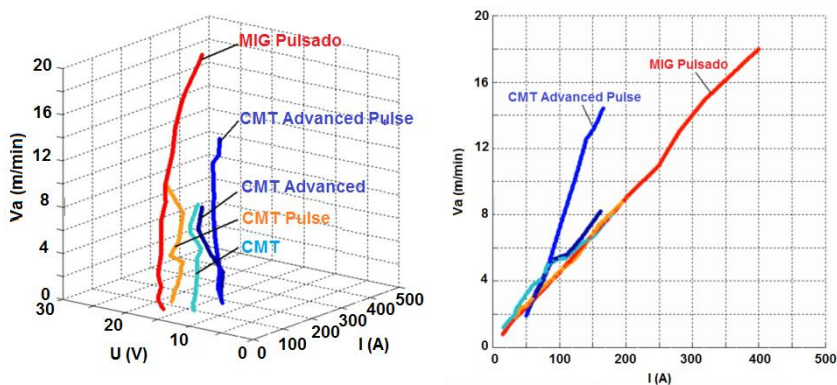


Figura 17 – Gráficos comparativos entre variantes CMT e MIG pulsado [27]

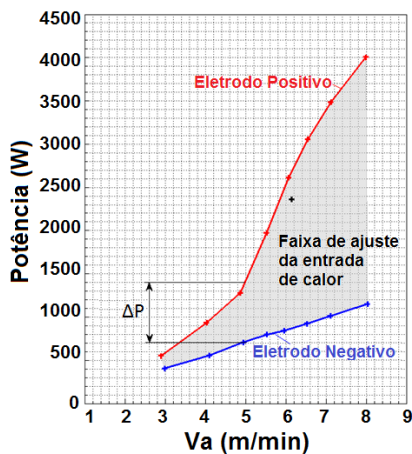


Figura 18 – Faixa regulável de aporte térmico para as versões CMT Advanced [27]

3.1.1. Metodologia

Algumas das características do CMT apontadas por Kazmaier foram verificadas com a realização de simples depósitos sobre chapa com cada uma das suas versões. O material de base foi o Alumínio 5052 com 4 mm de espessura nas dimensões de 50 x 227,5 mm. A velocidade de soldagem foi mantida em 6,67 mm/s (40 cm/min) para todas as

modalidades soldadas. A DBCP foi de 15 mm, o gás de proteção argônio regulado em 13 l/min e a tocha teve um ângulo de ataque levemente empurrando em 5°. Como a fonte da FRONIUS opera de forma sinérgica, sua regulagem foi baseada na velocidade de arame, fixada em 6 m/min para cada versão testada. A única liga de alumínio que possui (hoje) programas sinérgicos para as todas as versões do CMT é o ER4043, motivo pelo qual foi o arame escolhido para a realização dos ensaios.

3.1.2. Resultados e Discussões

Da Figura 19 até a Figura 22 estão expostos os cordões obtidos com cada variante testada. Visualmente, o cordão obtido com o CMT Advanced Pulse apresentou a menor molhabilidade entre os demais, o que sugere o menor aporte térmico para a peça. Também foi dessa versão de CMT o cordão com a superfície mais limpa e brilhante, entretanto é possível perceber alguma porosidade em sua superfície. Nessa versão do CMT ocorre a pulsação de corrente na polaridade positiva, enquanto na polaridade negativa acontecem os ciclos de curto-circuito (CMT). De modo a obter uma geometria mais adequada ao cordão depositado com essa versão, alterou-se a relação de pulsos por curtos, que originalmente era de 10/10, passando para 25/10. O resultado é mostrado na Figura 23.

Os sinais de tensão, corrente e velocidade de arame foram medidos com o SAP, que possui uma taxa de aquisição de 5 kHz [31]. Os valores obtidos estão dispostos na Tabela 2. Em uma rápida análise, é possível verificar que a versão que forneceu o menor nível de potência foi o CMT Advanced Pulse, com uma relação de 10 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo, justificando a baixa molhabilidade do seu cordão (Figura 22). Por outro lado, mesmo regulando o valor de 6 m/min, a velocidade média de arame foi 6,6 m/min, contra os 5,8 m/min do modo CMT e 5,7 m/min para o CMT Pulse. Essa capacidade de depositar mais material com potência menor pode ser a justificativa para a maior “*bridgibility*” dos modos Advanced em relação aos CMT que não utilizam a inversão de polaridade.

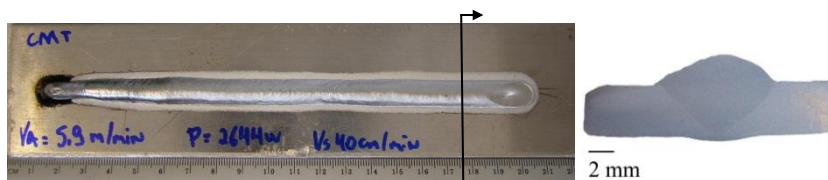


Figura 19 – Depósito realizado com a versão MIG CMT

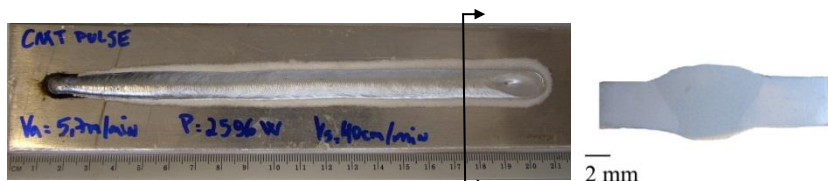


Figura 20 – Depósito realizado com a versão MIG CMT Pulse

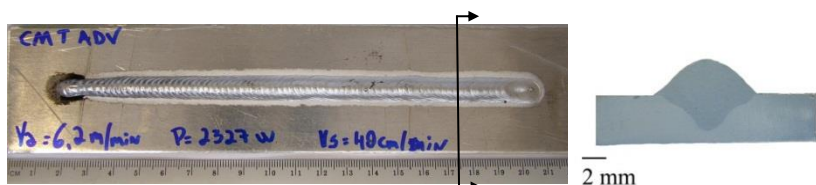


Figura 21 – Depósito realizado com a versão MIG CMT Advanced

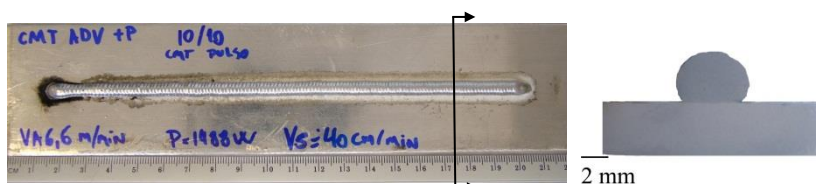


Figura 22 – Depósito realizado com a versão MIG CMT Advanced Pulse, relação de 10 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo

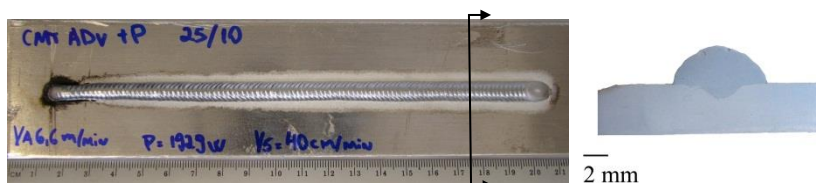


Figura 23 – Depósito realizado com a versão MIG CMT Advanced Pulse, relação de 25 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo

Tabela 2 – Dados aquisitados para diferentes versões do MIG CMT

	CMT	CMT Pulse	CMT Adv.	Adv. Pulse (10/10)	Adv. Pulse (25/10)	CMT (5183 Va=6)	CMT (5183 Va=5,4)
U _m (V)	17,4	19,7	-	-	-	17,3	14,5
I _m (A)	127	120	-	-	-	129	106
Va (m/min)	5,8	5,7	6,2	6,6	6,6	7,3	7
P (W)	2631	2596	2327	1488	1929	2608	1920
U _{ef} (V)	19,5	20,4	17,9	16	17,7	19,1	17,2
I _{ef} (A)	138	139	135	106	120	140	116
v (cm/min)	40	40	40	40	40	40	40

Considerando a necessidade de soldagem com arames de alumínio da série 5000 na construção do veleiro, mas especificadamente o arame ER5183, foram realizados dois ensaios com o modo CMT utilizando este arame. Os resultados obtidos também estão contidos na Tabela 2. O primeiro teste foi feito com a mesma regulagem de 6 m/min de velocidade de arame e com o mesmo programa sinérgico utilizado para o arame ER4043. O resultado da aquisição (Tabela 2) mostrou que, para (praticamente) os mesmos valores de tensão, corrente e potência, a velocidade de arame teve um incremento significativo, aumentando de 5,8 m/min com o arame ER4043 para 7,3 m/min com o ER5183. O cordão apresentou um aspecto escurecido com bastantes respingos durante a soldagem. O segundo ensaio foi feito com uma regulagem de velocidade de arame em 5,4 m/min e o valor médio lido pelo SAP ficou na faixa de 7 m/min, com uma aparência bem mais limpa que o cordão anterior e poucos respingos durante a soldagem. Os dois cordões podem ser verificados na Figura 24.

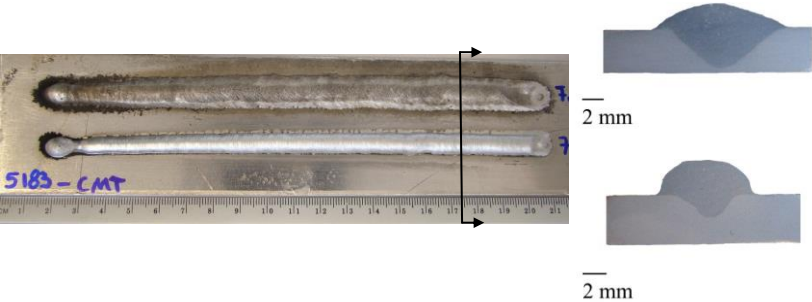


Figura 24 – Depósito realizado com a versão MIG CMT para o arame ER5183; Em cima, regulagem de 6,0 m/min; abaixo regulagem de 5,4 m/min

Um dos motivos para a formação de respingos e aparência escurecida do primeiro cordão seria o alto nível de corrente imposto durante o período de arco. Primeiro, analisando o oscilograma adquirido quando o depósito foi feito com o arame ER4043, observa-se que, no tempo de arco, a corrente atinge valores maiores que a corrente de transição para alumínio. Durante esse tempo é possível perceber picos de tensão que caracterizam o destacamento de gotas antes mesmo da ocorrência do curto-circuito (Figura 25) que, de certa forma, se comportam de maneira repetitiva e estável. Pode-se dizer então que existe uma transferência por voo livre intercalada com as deposições em curto-circuito do Tipo CMT.

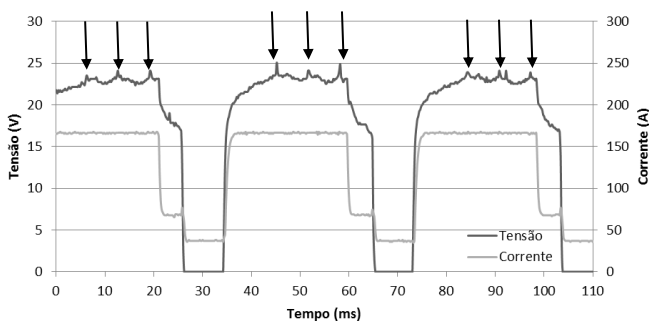


Figura 25 – Oscilograma de tensão e corrente para a soldagem MIG CMT, arame ER4043, regulagem de Va em 6 m/min

Todavia, observou-se que o arame ER5183 apresenta uma transferência metálica com característica mais explosiva, não propiciando a mesma repetitividade, estabilidade e suavidade na transferência das gotas durante esse tempo de arco. Além disso, como esse arame possui uma maior taxa de fusão que o ER4043, para que houvesse uma estabilidade no comprimento de arco, o sistema de controle da fonte aumentou a velocidade de arame média. Sob essas condições acaba acontecendo a formação de gotas de maior diâmetro durante o período de arco, o que contribui na instabilidade da transferência metálica. A Figura 26 mostra a irregularidade no oscilograma de tensão. É durante esse momento que estariam sendo originados os respingos e toda a camada escurecida depositada sobre o cordão. O problema foi minimizado quando a velocidade de arame foi regulada para o valor de 5,4 m/min, onde a corrente de arco foi reduzida para 140 A e o tempo para 12 ms, aumentando com isso a frequência dos curtos (Figura 27).

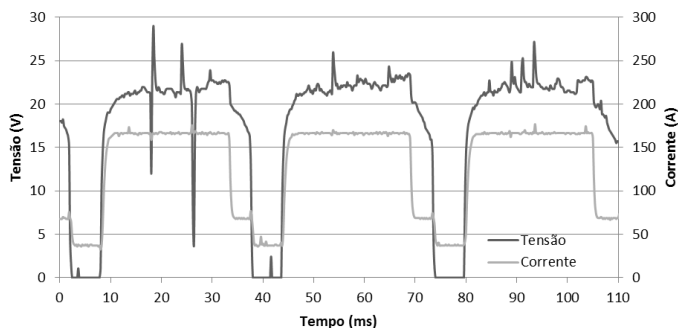


Figura 26 – Oscilograma de tensão e corrente para a soldagem MIG CMT, arame ER5183, regulagem de V_a em 6 m/min

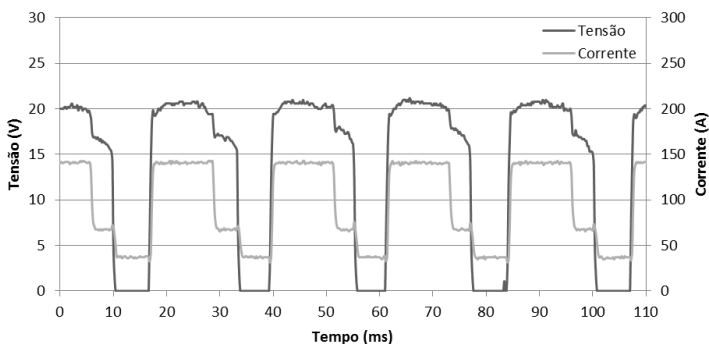


Figura 27 – Oscilograma de tensão e corrente para a soldagem MIG CMT, arame ER5183, regulagem de V_a em 5,4 m/min

Esse comportamento observado para as duas diferentes ligas de alumínio justifica a necessidade de programas sinérgicos específicos. O programa sinérgico do modo CMT para arames da série 5000 que a fonte disponibiliza é identificado como sendo para o arame ER5356. Tal arame não é citado nos ensaios devido à especificação inicial de utilização do arame ER5183 na construção do veleiro da UFSC. Entretanto, verificou-se que com esse programa, o valor máximo de corrente que se pode regular é de somente 95 A, que corresponde a uma velocidade de arame de 6,1 m/min. Supõe-se que a instabilidade observada para altos valores de corrente de arco seja o fator limitante para esse programa sinérgico fornecido pelo fabricante.

O CMT Advanced aparece como uma solução para o preenchimento de aberturas (gap) variáveis. A capacidade de um maior

depósito de material é atribuída à polaridade negativa, que proporciona um aumento na taxa de fusão do arame devido ao efeito de escalada do arco. Na Figura 28 é apresentado o oscilograma do ensaio com o CMT Advanced para o arame ER4043 correspondente à Figura 21. A Tabela 3 traz os valores médios e eficazes para um ciclo positivo e negativo.

Nesse oscilograma constata-se os 7 ciclos em cada polaridade, que resultam em uma frequência de inversão de polaridade de aproximadamente 2,8 Hz. A velocidade de arame oscila nessa mesma frequência e percebe-se que durante o período negativo da corrente a velocidade possui menores valores, divergindo do esperado. Uma suposição levantada para justificar os menores valores de velocidade de arame na polaridade negativa é a inserção de um atraso na resposta do arame sentida no cabeçote alimentador gerado pelo buffer (pulmão) do conjunto de mangueiras do CMT. A fim de verificar essa conjectura, realizou-se um cordão de solda com uma baixa frequência de inversão de polaridade (0,2 Hz), com 100 ciclos no positivo contra 50 ciclos no negativo. O resultado pode ser visto na Figura 29, onde se percebe um aumento na velocidade de arame durante a polaridade negativa.

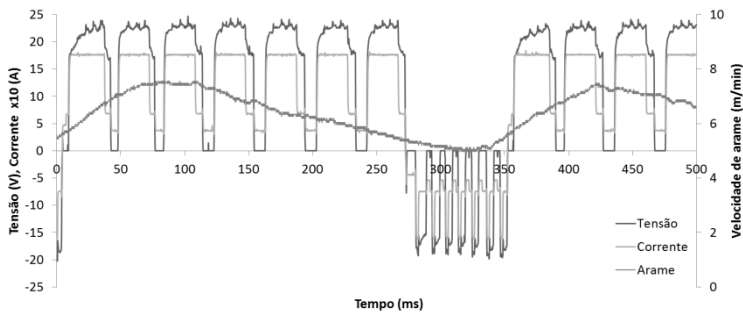


Figura 28 – Oscilograma de tensão, corrente e Velocidade de arame para a versão CMT Advanced, 7 ciclos em cada polaridade

Tabela 3 – Dados adquiridos com o SAP para fase positiva e negativa do CMT Advanced

	Fase Positiva	Fase Negativa
U_m (V)	17,4	10,1
I_m (A)	133	86
V_a (m/min)	6,6	5,2
P (w)	2758	1050
U_{ef} (V)	19,4	13,2
I_{ef} (A)	146	93
T (ms)	40	10

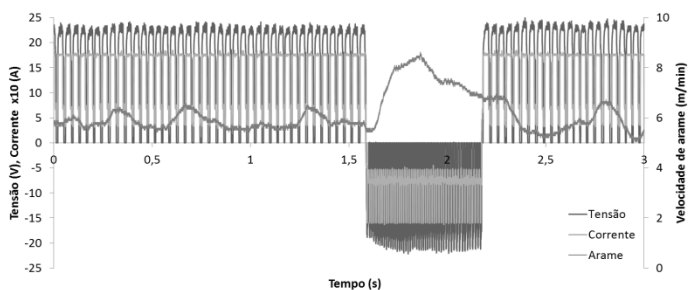


Figura 29 – Oscilograma de tensão, corrente e Velocidade de arame para a versão CMT Advanced, 100 ciclos no positivo e 50 no negativo

A outra versão do CMT Advanced, chamada CMT Advanced Pulse, como citado no início deste, realiza a pulsação de corrente na polaridade positiva, enquanto na polaridade negativa acontecem os ciclos de curto-circuito (CMT). A Figura 30 traz um oscilograma de tal versão e a Tabela 4 os valores adquiridos com o SAP. O que chama a atenção é o fato de que, apesar dessa modalidade inserir o período de pulsos de corrente, sua potência resultante foi menor que para o CMT Advanced. O que se percebe é que o programa sinérgico que a fonte disponibiliza coloca para o CMT Advanced Pulse uma maior relação de tempo negativo/positivo. Como durante a polaridade negativa os valores de potência são bem menores, o valor médio da potência acaba sendo reduzido.

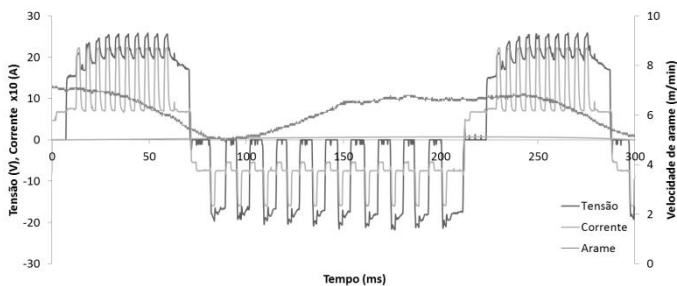


Figura 30 – Oscilograma de tensão, corrente e Velocidade de arame para a versão CMT Advanced Pulse, 10 pulsos no positivo e 10 ciclos no negativo

Tabela 4 – Dados adquiridos com o SAP para fase positiva e negativa do CMT Advanced Pulse

	Fase Positiva	Fase Negativa
U_m (V)	21,5	9,7
I_m (A)	129	84
V_a (m/min)	6,6	6
P (w)	2912	974
U_{ef} (V)	21,6	13,3
I_{ef} (A)	144	89
T (ms)	70	130

Ampliando as escalas do oscilograma de forma a detalhar a fase de pulsação de corrente, observa-se que com uma corrente de pulso de 222 A e um tempo de pulso de 1,8 ms o destacamento da gota ocorre logo na descida da corrente de pulso (Figura 31). A avaliação de parâmetros de pulso na soldagem de alumínio é assunto tratado no capítulo 5.

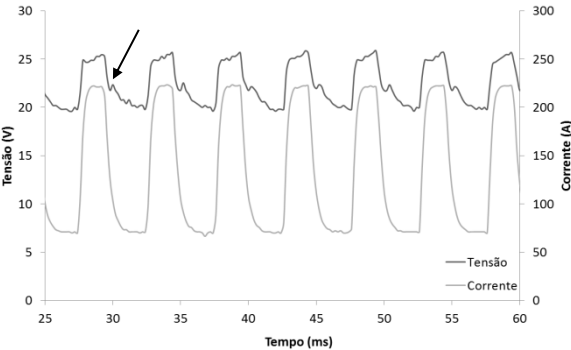


Figura 31 – Detalhe do período de pulsação de corrente no CMT Advanced pulse

4. DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA A SOLDAGEM DE RAIZ EM LIGAS DE ALUMÍNIO NAVAL

Para observar a dificuldade inerente ao processo e aos procedimentos foram realizados alguns ensaios exploratórios. O objetivo era união de chapas de alumínio com 6 mm de espessura, dispostas em junta de topo, na posição vertical. Por ter um custo menor, os ensaios iniciaram sobre chapas de alumínio 1100 de 6 mm de espessura, com o arame de alumínio ER4043 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção argônio em 13 l/min. Os corpos de prova foram montados com duas chapas cortadas nas dimensões de 250x80 mm. Os ensaios com chanfros em V com 60° de inclinação mostraram a necessidade de uma maior abertura do chanfro e por isso foi alterada a inclinação para 80°. A abertura foi mantida em 1,5 mm com o uso de cobre-juntas ou backings cerâmicos. Os resultados apresentaram problemas como falta de penetração, fechamento da junta, formação de raiz negativa ou rechupe, excesso de calor e material, desalinhamento do cordão de solda, extinção do arco durante a passagem pela abertura entre chapas (gap). A Figura 32 e a Figura 33 mostram algumas das dificuldades verificadas.



Figura 32 – Problema na soldagem de raiz, posição vertical ascendente, modo MIG Convencional

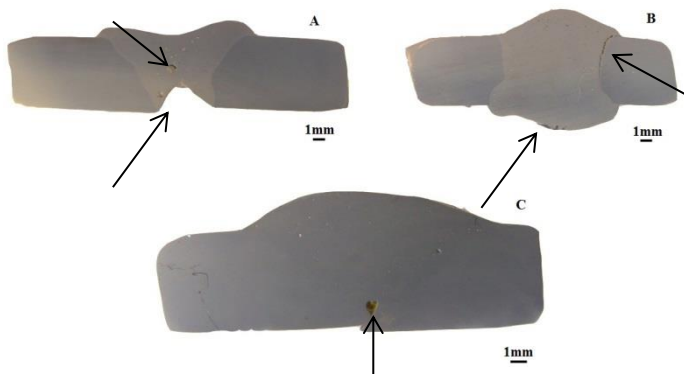


Figura 33 – Problemas gerais encontrados na soldagem de raiz de ligas de alumínio; A – efeito de rechupe e porosidade; B – excesso de material e trincas; C – falha de fusão, baixa penetração, fechamento do gap

Durante a execução desses ensaios percebe-se que, quando a fonte de soldagem impõe a corrente e principalmente quando a transferência metálica é dada por projeção axial, também chamada de spray, acontece uma grande variação da altura do arco. Nessas condições, o arco se comporta de forma muito instável, variando seu comprimento desde o contato do arame com a peça até a iminência de queima do bico de contato. O trabalho de Kiyohara et al [32] trata sobre as características de fusão de eletrodos de alumínio na soldagem MIG, que têm uma ligação direta com o comprimento de arco. A metodologia empregada em seus ensaios consistia na utilização de uma fonte de soldagem com comando em tensão, que era aumentada gradativamente para uma mesma velocidade de arame, fazendo a leitura dos níveis de corrente para cada ponto. Os resultados levantados geraram curvas plotadas em escala de tensão média por corrente média, que traduzem a característica de fusão do eletrodo para cada velocidade de arame fixada (Figura 34). Essas curvas foram denominadas por Quites e Dutra [33] de curvas de isoconsumo. Em seus experimentos, Kiyohara utilizou como metal de adição o alumínio ER5183 com diâmetro de 1,6 mm.

O autor observou que, na região denominada por ele de meso-spray, a taxa de fusão específica aumenta com a redução no comprimento do arco. Esse fenômeno é conhecido como “auto-regulagem do comprimento do arco”, onde cada valor de corrente está associado a somente um valor de tensão, “auto regulando” a altura média do arco. Porém, esse modo de transferência acontece de maneira

muito errática, com formação de gotas de grande diâmetro, eventuais curtos-circuitos e respingos.

Na região de spray, a curva se apresenta de forma vertical, onde o aumento da tensão praticamente não altera o valor da corrente. A instabilidade da altura do arco está associada a esse comportamento. Tendo em vista a baixa resistividade do alumínio, o arco voltaico pode alcançar vários níveis de tensão para um mesmo valor de corrente. Se a fonte de soldagem está impondo a corrente, a tensão estaria “livre” para variar dentro da faixa vertical vista no gráfico, colocando o arco em uma situação que poderia ser associada a um equilíbrio indiferente. Santos [26] repete tais procedimentos, porém, o material de adição utilizado foi o arame ER4043 de 1,2 mm. Seus resultados também mostraram um comportamento similar ao obtido por Kiyohara em tensões superiores a 18 V.

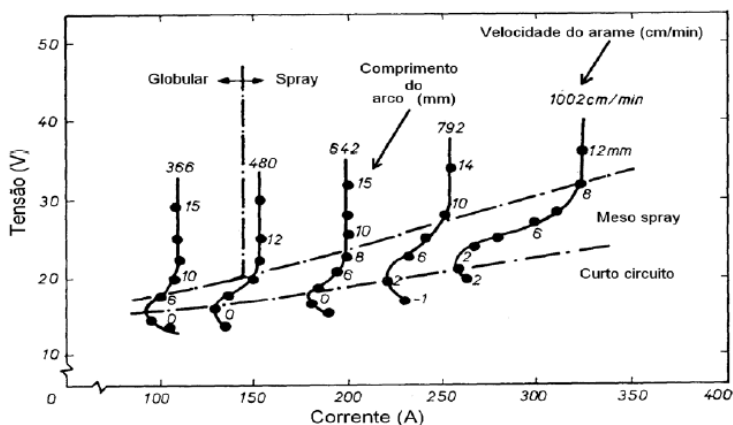


Figura 34 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: Arame ER5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio), conforme Kiyohara et al [32]

Para verificar a repetitividade desse comportamento para o arame ER5183 de 1,2 mm foram feitos ensaios repetindo a metodologia utilizada por Kiyohara, conforme consta na sequência.

4.1. AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ARCO NA SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO

Com o objetivo de analisar o comportamento de variação da altura média do arco na soldagem MIG de alumínio foi iniciado um

estudo das características de fusão do arame de alumínio naval ER5183, considerando a necessidade do uso desse arame na construção de um veleiro para pesquisas oceanográficas da UFSC. O estudo teve como metodologia inicial os experimentos realizados por Kiyohara em 1979 [32] em que verificava as características de fusão do arame ER5183 de 1,6 mm de diâmetro utilizando o processo MIG convencional. No caso do presente trabalho, os dados para o arame ER5183 são determinados para ambos os casos, MIG convencional e CMT. A soldagem foi conduzida em simples depósitos sobre chapas. Para uma mesma velocidade de arame, a tensão de soldagem foi gradativamente aumentada, e em cada situação foi medido o valor da corrente.

Para o MIG convencional foi utilizada a fonte de soldagem Digiplus do fabricante IMC Soldagem. A velocidade do arame, com 1,2 mm de diâmetro, foi fixada em 10 mm/s (6,0 m/min) e a DBCP foi fixada em 17 mm. A tensão de soldagem foi regulada em um valor mínimo no limite da estabilidade do processo, e aumentada progressivamente em 1 V até a iminência de fusão do bico de contato. A velocidade de soldagem foi fixada em 10 mm/s (60 cm/min) e a vazão de gás Argônio em 13 l/min. Os sinais de tensão, corrente e V_a foram medidos com o SAP com taxa de aquisição de 5 kHz.

Para o CMT foi utilizada a fonte Transpuls Synergic 3200CMT do fabricante FRONIUS. Neste caso, a determinação das coordenadas de tensão e corrente para uma mesma velocidade de arame não foi tão fácil de ser obtida porque o programa é sinérgico. Mesmo que a variável de entrada seja a velocidade do arame, esta depende e varia com a regulagem da correção da altura do arco, variável que equivale à regulagem de tensão. Para que todos os pontos de coordenadas tensão versus corrente correspondessem à mesma velocidade de arame, os ensaios foram conduzidos com medição “online” da velocidade média de arame, utilizando o SAP. Assim, para valores de altura do arco, que no equipamento tem faixa indicativa entre -30 a +30 com variação unitária, regulava-se V_a de tal maneira que o valor real correspondesse a 6 m/min. Os resultados medidos nas duas versões MIG foram plotados no gráfico mostrado na Figura 35 e são aqui denominados de curvas de isoconsumo.

Antes de uma análise com o devido critério científico, poder-se-ia concluir a partir da observação da Figura 35 que a potência elétrica do processo CMT é inferior a do MIG convencional, fato que é contestado no item 4.3 – Análise dos resultados.

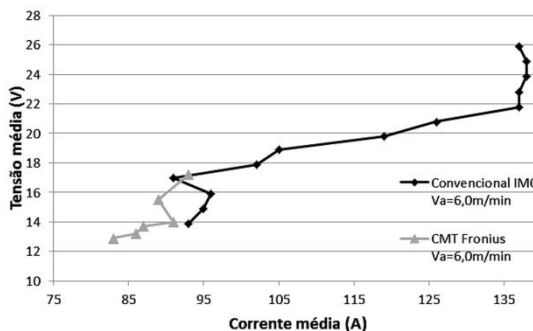


Figura 35 – Curva de isoconsumo para o alumínio ER5183 com 1,2 mm de diâmetro, gás Argônio e velocidade de alimentação de arame de 0,1 m/s (6,0 m/min)

4.2. PROCEDIMENTOS PARA A SOLDAGEM DE RAIZ

4.2.1. Soldagem de raiz manual

Durante a execução de alguns ensaios exploratórios foram testadas várias variantes do processo MIG/MAG, como o MIG convencional, MIG pulsado, MIG AC e o CMT com suas diferentes versões. De modo geral, as variantes que transferem as gotas por voo livre produzem um maior comprimento de arco que acaba fundindo uma maior área nas laterais do chanfro e dificulta a dirigibilidade do metal de adição para o fundo do chanfro, prejudicando a formação da raiz. Quando a transferência metálica acontece por curto-circuito é possível que o material seja depositado na região mais funda do chanfro, facilitando a formação da raiz. Por esse motivo, os modos MIG Convencional e CMT tiveram destaque em relação aos demais, o que justifica os ensaios de caráter comparativo entre esses modos.

Com isso, foram realizadas soldagens de chapas de liga alumínio 5083 com 6 mm de espessura, dispostas em junta de topo com espaçamento de 1,2 mm, chanfro de 80° na posição plana e gás argônio em 13 l/min. O critério básico para esta comparação foi permitir que o soldador buscasse um procedimento com o CMT de tal modo que conseguisse uma solda com características visuais de aceitabilidade, tanto na face como na raiz. Embora que com este processo (CMT) seja relativamente fácil a obtenção de uma raiz sem a utilização de cobre-juntas ou backing, foi usado o backing uma vez que o objetivo destes

ensaios era a comparação com o MIG convencional. Desta maneira, a capacidade de cada versão do processo não seria um impedimento para os ensaios comparativos em uma mesma geometria de junta. A velocidade de arame adotada pelo soldador foi de 11,7 mm/s (7 m/min). Assim, no MIG convencional foi assumida a mesma velocidade de arame, com a tensão regulada em 14 V. A fonte possibilita ainda a regulação de duas variáveis que atuam na dinâmica de subida e descida da corrente, denominadas de K_s e K_d , respectivamente. Para a solda realizada, os valores foram: $K_s = 60$, $K_d = 50$, o que resultou em uma taxa de subida de corrente de aproximadamente 34 A/ms e uma descida de corrente de 16 A/ms. O soldador adotou um ângulo de ataque levemente empurrando em aproximadamente 5° . Os resultados obtidos são verificados nas Figura 36 e Figura 37.

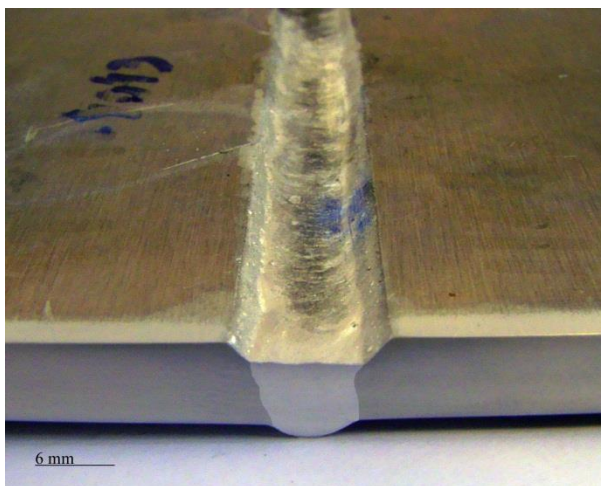


Figura 36 – Solda manual de Liga de Alumínio 5083 com arame ER5183, posição plana, chapa de 6 mm com MIG CMT regulação de corrente em 110 A, V_a média = 7,0 m/min

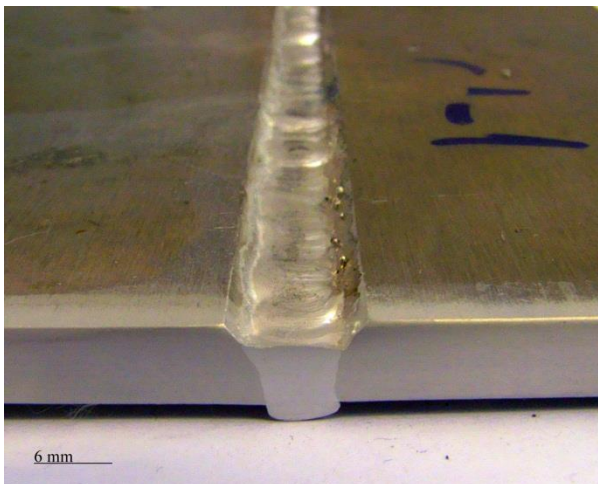


Figura 37 – Solda manual de Liga de Alumínio 5083 com arame ER5183, posição plana, chapa de 6 mm com MIG Convencional regulagem de tensão em 14 V, $V_a = 7,0$ m/min, $K_s=60$, $K_d=50$

4.2.2. Soldagem de raiz mecanizada

Observar como o soldador conduz a tocha é um bom ponto de partida para a mecanização de um procedimento de soldagem. Nos ensaios mostrados anteriormente, o movimento da tocha aconteceu de forma praticamente linear, ou seja, sem nenhum tipo de oscilação transversal e longitudinal. As tentativas de realização da soldagem utilizando um movimento retilíneo com um robô ou um Tartôlope não tiveram o mesmo sucesso. A facilidade de desalinhamento do cordão de solda e a tendência de formação da poça em somente um dos lados do chanfro se tornaram muito proeminentes. Isso torna evidente que, até mesmo inconscientemente, o soldador atua no controle da solda e da poça de fusão. Por esse motivo, para realizar de forma mecanizada a soldagem de raiz, se fez necessário o uso de um movimento de tecimento. A forte tendência de fechamento da junta no alumínio prejudica a formação da raiz de solda, fazendo com que a abertura entre chapas fosse aumentada para 2 mm. Outros parâmetros de junta permaneceram idênticos ao ensaio anterior: junta de topo, chanfro de 80° sem nariz e chapa de alumínio 5083 com 6 mm de espessura.

Os baixos valores de frequência de oscilação da tocha facilitaram os eventos em que o arame passava entre o gap, originando uma possível falha no cordão de solda. Dessa forma, o movimento de

tecimento foi programado com uma frequência de 4 Hz e amplitude de 4 mm. Além disso, quando o arame passava entre o gap e batia no backing cerâmico, provocava uma grande perturbação no arco. Isso fez com que começasse a ser utilizado um backing de cobre (Figura 38). A velocidade de soldagem utilizada foi de 40 cm/min. A tocha teve um ângulo ajustado em 5° no sentido de empurrar o cordão de solda e a DBCP foi de 15 mm a partir do fundo do chanfro.

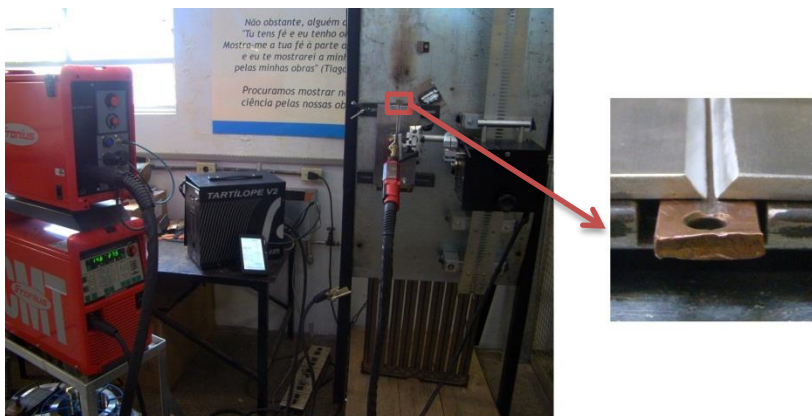


Figura 38 – Bancada de ensaios com detalhe na configuração da junta e backing de cobre

Em uma primeira sequência de ensaios foram realizadas soldas na posição plana a exemplo da soldagem manual já apresentada. Para uma análise comparativa entre o MIG convencional e o CMT, a soldagem com as duas modalidades aconteceu em um mesmo corpo de prova como mostra a Figura 39. Para as duas versões, a Va média foi regulada em 7 m/min. As macrografias dos resultados obtidos em uma amostra de cada modalidade estão colocadas na Figura 40.



Figura 39 – Soldagem de raiz em alumínio naval comparando MIG Convencional e CMT na posição plana

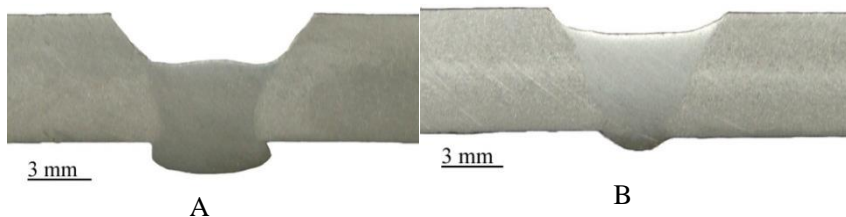


Figura 40 – Secção transversal das soldagens mecanizadas com $v = 40$ cm/min e $V_a = 7,0$ m/min, em: A – MIG Convencional, B – MIG CMT

Tendo em vista o bom desempenho do CMT na execução desses ensaios, em uma segunda etapa foram realizadas soldagens na posição vertical ascendente. Bons resultados foram alcançados utilizando os mesmos parâmetros de movimento que na posição plana, como mostra a Figura 41.

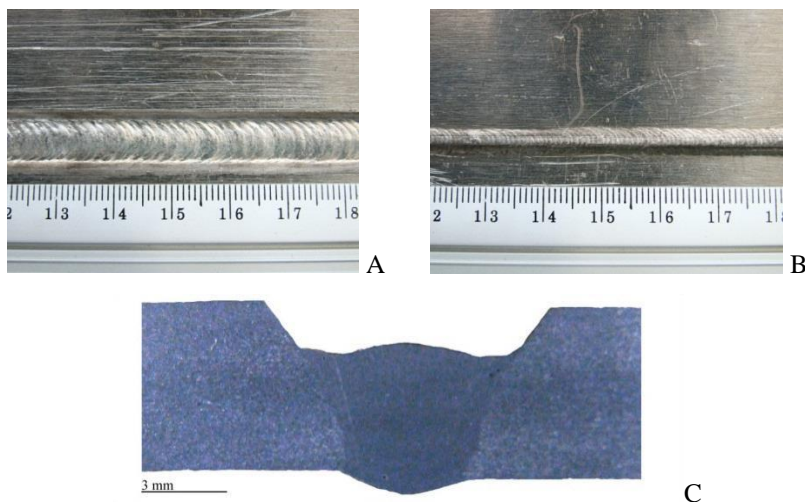


Figura 41 – Solda de raiz em liga de alumínio naval 5083, MIG CMT com regulagem de corrente em 110 A, V_a média = 7,0 m/min, posição vertical ascendente, arame ER5183 de 1,2 mm. A – cordão de solda; B – raiz da solda; C – Macrografia

4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As curvas de isoconsumo obtidas para o modo MIG convencional e CMT (Figura 35), dispostas em um mesmo sistema de coordenadas, induzem a atribuição de uma menor potência para a curva do CMT. Os cálculos de potência revelaram o contrário, cabendo aqui fazer uma menção ao correto procedimento do cálculo da potência elétrica.

4.3.1. Cálculo de potência elétrica

A definição de potência elétrica é o produto da tensão pela corrente. Entretanto, acontece com frequência uma interpretação inadequada desta. Algumas vezes é realizada a leitura da tensão média e da corrente média e ao produto disto é denominado de potência. Isto não é correto porque o produto das médias de duas variáveis é diferente da média dos produtos dos valores sazonais ou individuais das variáveis envolvidas. Assim, a equação 2 não é adequada. Outro critério, que por vezes também é adotado, é o produto da tensão eficaz pela corrente eficaz, conforme a equação 3, o que para um processo submetido a situações dinâmicas, também é errôneo. Esta última equação somente é válida quando a carga elétrica obedecer estritamente à lei de Ohm. O desvio do arco em relação à lei de Ohm é tanto maior quanto maior for a diferença entre os patamares dos valores de corrente, pois a componente da força contra eletromotriz no arco se torna altamente pronunciada.

$$P = U_m \times I_m \quad (2)$$

$$P = U_{ef} \times I_{ef} \quad (3)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \times I_i}{n} \quad (4)$$

O cálculo que considera os valores pontuais de tensão e corrente, representado pela equação 4, é o considerado correto [34,35,36]. Todos os valores de potência apresentados neste trabalho foram calculados usando essa equação e revelaram que a variante MIG CMT resulta em maior potência. Para tanto basta observar a Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios de Tensão, Corrente e Potência, correspondentes a faixa de operação do CMT na curva de isoconsumo para o arame ER5183

CMT FRONIUS					
Um (V)	Im (A)	P (W)			
12,9	83	1430	Convencional IMC		
13,2	86	1513	Um (V)	Im (A)	P (W)
13,7	87	1585	13,9	93	1301
14	91	1601	14,9	95	1431
15,5	89	1608	15,9	96	1533
17,2	93	1734	17	91	1549
			17,9	102	1834
			18,9	105	1988
			19,8	119	2371
			20,8	126	2630
			21,8	137	2995
			22,8	137	3125
			23,9	138	3293
			24,9	138	3444
			25,9	137	3545

Em todo o campo de tensão média (U_m) abrangida pelo CMT, desde 12,9 V a 17,2 V, a potência deste é maior que o MIG convencional. Assim, à versão CMT não pode ser atribuído que ela seja boa porque é mais “fria” que outras, mas sim se devem buscar as reais razões para que ela, em determinado contexto, possa ser considerada como melhor.

Em uma análise mais adequada, considerando a devida definição de potência, pode-se perceber que a fundamental razão desta aparente dicotomia está na duração dos níveis altos e baixos da corrente e da tensão. Enquanto no MIG convencional os picos de corrente de até 200 A são praticamente instantâneos (Figura 1), no CMT uma corrente de 125 A se mantém constante por mais de 12 ms (Figura 2). Nesta mesma fase a tensão também permanece em patamares altos, resultando em uma potência alta. Após esta fase, a tensão cai drasticamente a quase zero e a corrente assume valores próximos a 30 A. Assim, nessa etapa a potência é praticamente zero. Nesta primeira abordagem, poder-se-ia concluir que o CMT conduziria a uma baixa potência, já que os pulsos de corrente são mais baixos que no MIG convencional e também a potência nos curtos-circuitos é muito baixa. Além disso, podem-se adicionar a isto os tempos relativos de curto-circuito e de arco aberto. No CMT, de acordo com o oscilograma da Figura 2, o tempo de curto

circuito corresponde a aproximadamente 32% do período da onda, enquanto o de arco aberto a 68%. Já no MIG convencional (Figura 1), os respectivos tempos são de 24% e 76%. Assim, tempos maiores de arco aberto (potência maior) relativamente aos tempos de curto-circuito (potência menor) conduziriam a afirmar que o CMT teria menor potência. Esta análise, entretanto, é equivocada e para um entendimento mais didático apresentam-se na Figura 42 e na Figura 43 os oscilogramas idealizados a partir das situações reais da Figura 1 e Figura 2, tomando-se 100 pontos como se fosse aquisição de dados. Dessa forma os cálculos de potência não deixam margem a erro. A Tabela 6 mostra os valores calculados, onde se pode constatar a grande diferença entre a potência calculada de maneira correta e as consideradas frequentemente. Assim, também se pode ver que as formas de onda do CMT conduzem a uma maior potência do que o MIG convencional.

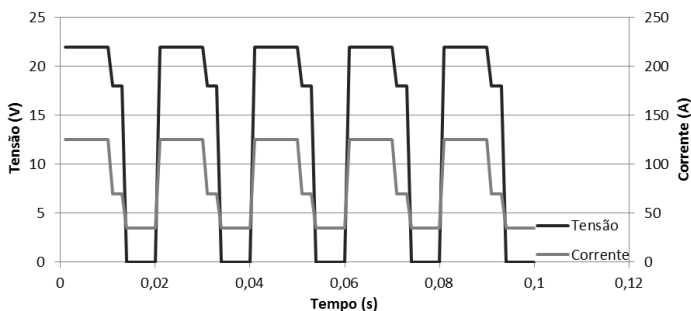


Figura 42 – Oscilogramas hipotéticos de tensão e corrente para uma situação próxima ao CMT

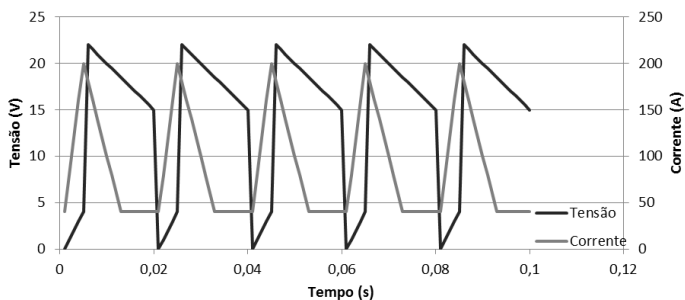


Figura 43 – Oscilogramas hipotéticos de tensão e corrente para uma situação próxima ao MIG Convencional

Tabela 6 – Dados calculados para as situações hipotéticas de CMT e MIG Convencional

	Oscilograma Figura 42	Oscilograma Figura 43
Im (A)	85,3	88,0
Um (V)	13,7	14,4
Ief (A)	94,7	103,2
Uef (V)	17,0	16,2
Um x Im	1169	1267
Uef x Ief	1610	1672
P (W)	1564	1223

Mesmo com valores de tensão e corrente médias menores que os da Figura 43, os dados do oscilograma da Figura 42 resultaram em uma potência 27,8% maior, divergindo do simples produto de tensão e corrente, tanto em valores médios quanto eficazes. Quando são plotadas as curvas de tensão x corrente da Figura 42 e da Figura 43 em uma mesma escala (Figura 44), fica evidente que o MIG convencional produz instantaneamente maiores valores de potência, o que levaria a conclusão equivocada que essa versão do MIG produz maior potência em relação ao CMT.

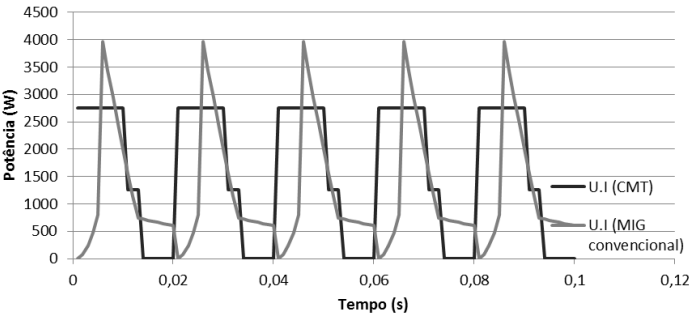


Figura 44 – Oscilogramas de Tensão x Corrente para as curvas hipotéticas do CMT e MIG convencional

4.3.2. Solda de raiz

Para a obtenção das soldas de raiz, de acordo com o que já foi descrito anteriormente, foram desenvolvidos dois procedimentos, um

para cada modalidade de MIG, tendo como similitude entre eles a velocidade de arame. Os critérios de avaliação foram a facilidade do soldador em conduzir as soldas e a observação da estabilidade da transferência de gotas por meio de histogramas. Na Figura 45A e Figura 45B são apresentados os histogramas para os períodos de transferência. Sem dúvida alguma o histograma para o CMT revela um processo muito mais estável, pois concentra as transferências em aproximadamente 21 ms. O MIG convencional, embora considerado estável nesta situação, apresenta uma maior aleatoriedade dos períodos de transferência. Quanto às características de fusão, é conveniente novamente salientar que há uma sensível diferença entre as modalidades de processo. No presente caso, há uma diferença de aproximadamente 5% nas correntes médias correspondentes (Tabela 7), fato que é quase sempre negligenciado na literatura, quando são apresentadas relações diretas entre a corrente média e a velocidade de fusão dos eletrodos, sem fazer menção que tal relacionamento é particular para o ensaio em questão ou que a informação é apenas orientativa. No que tange à potência do processo, correspondente a uma mesma velocidade de fusão, os resultados são muito mais discrepantes em relação ao convencionalmente considerado. Pela Tabela 7 pode ser constatado que o CMT resulta em 33,9% maior potência que o MIG convencional. Por isso, deve-se fazer uma ressalva em relação ao que é também afirmado frequentemente de que a velocidade de fusão dos eletrodos não depende da tensão. Esta afirmativa só está acometida de pequeno erro dentro de uma mesma modalidade de processo, pois a tensão, em não sofrendo variações consideráveis, pode ser substituída por uma constante, aparecendo nas equações somente a variável intensidade de corrente. Quanto à qualidade dos cordões de solda, é indubitável o melhor resultado com a utilização do CMT, revelando uma aparência do lado reverso que não deixa dúvidas quanto à sua aceitabilidade. Já a raiz com o MIG convencional revela uma má aparência, deixando dúvidas quanto à sua aceitabilidade.

Tabela 7 – Parâmetros adquiridos em soldagem de raiz manual, com velocidade de arame de 7 m/min

	CMT	MIG Convencional
Im (A)	105	112
Um (V)	14,5	12,8
P (W)	1946	1453

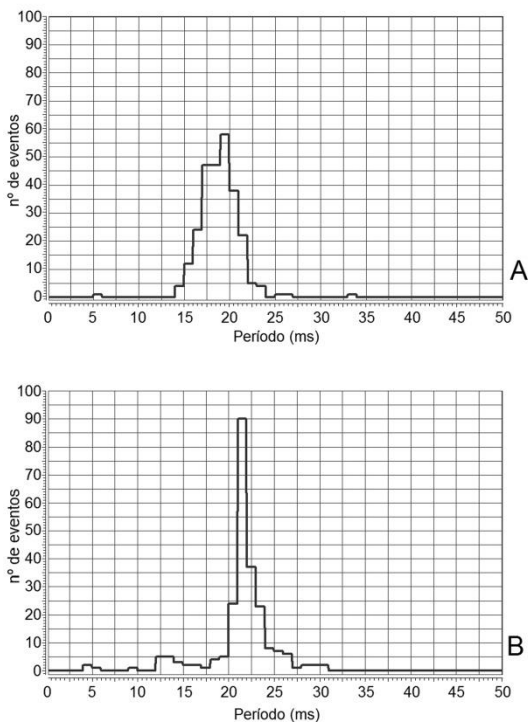


Figura 45 – Histogramas dos períodos de transferência num intervalo de 5 segundos, em: A – MIG Convencional, B – MIG CMT

4.3.3. Avaliação em termos do rendimento bruto de fusão

De modo a se obter uma avaliação comparativa que relacione o calor aportado à peça que contribuiu para a fusão do material, foram calculados os valores de rendimento de fusão para soldagens realizadas com o CMT e o MIG convencional. Antes são necessárias algumas considerações a respeito desse cálculo.

O rendimento de fusão é dado pela relação entre a quantidade de calor necessária para a fusão do material e a quantidade de energia fornecida pela fonte. Quando, no cálculo do rendimento de fusão, é considerado o valor do rendimento térmico, ou seja, a parcela de energia fornecida pela fonte que realmente é aportada à peça, tem-se o rendimento líquido (ou efetivo) de fusão. A não consideração do

rendimento térmico nos cálculos leva ao valor do rendimento bruto de fusão. Conforme o estudo feito por Reis et al [37], o rendimento bruto de fusão pode ser calculado como:

$$\eta_{bf} = \frac{Q_f}{E} \quad (5)$$

Onde,

Q_f = calor necessário para a fusão do material (J/cm)

E = Energia fornecida pela fonte (J/cm)

$$Q_f = \rho \cdot A_f \cdot C_p (T_f - T_o) + \rho \cdot A_f \cdot L_f \quad (6)$$

Onde,

ρ = densidade (g/cm³)

A_f = Área fundida (cm²)

C_p = calor específico (J/g°C)

T_f = Temperatura de fusão (°C)

T_o = Temperatura inicial (°C)

L_f = Calor Latente de fusão (J/g)

$$E = \frac{P}{v} \quad (7)$$

Onde,

P = potência (W)

v = velocidade de soldagem (cm/s)

De acordo com essa metodologia, o cálculo do rendimento bruto de fusão é dado pela divisão entre a quantidade de calor usada para a fusão (Q_f) pela energia de soldagem (E). Como o cálculo da energia leva em consideração a velocidade de deslocamento da tocha, o valor do rendimento foi determinado com base em soldas realizadas de forma mecanizada, garantindo assim que a velocidade de soldagem aplicada fosse a mesma em todos os cordões. A Tabela 8 traz os valores obtidos com a realização de três ensaios com cada uma das versões do MIG (CMT e convencional). O cálculo de Q_f utiliza, entre outros dados, o valor da área fundida, que para os cálculos em questão foi obtido com

medições de macrografias da área total fundida. Os valores médios de rendimento bruto de fusão foram obtidos com a média das três amostras. Para o CMT, o rendimento médio foi de 26,7% contra 33,5% para o MIG convencional.

Tabela 8 – Dados da soldagem de raiz comparativa entre MIG convencional e CMT, com valor do rendimento bruto de fusão

Ensaio	CMT			MIG Convencional		
	CMT1	CMT2	CMT3	Conv1	Conv2	Conv3
A_f (mm ²)	25,8	24,8	27,4	26,2	26,4	26,3
U_m (V)	14,1	13,6	14,2	13,3	13,4	13,8
I_m (A)	104	98	100	111	110	106
P (w)	1866	1707	1794	1453	1442	1435
U_{ef} (V)	16,6	16,2	16,7	14,8	14,9	15,1
I_{ef} (A)	117	109	111	119	117	117
η_{bf}	25,4 %	26,7 %	28,1 %	33,2%	33,7%	33,7%
η_{bf} médio	26,7%			33,5%		

5. SOLDAGEM MIG PULSADA COM ARAME ER4043

Para que sejam obtidos resultados adequados na soldagem de chapas espessas e principalmente quando o material se trata do alumínio, é necessário o fornecimento de maiores níveis de energia à peça e a poça de fusão. Nesse contexto pode ser aplicada a soldagem MIG com corrente pulsada. A sequência do trabalho trata do desenvolvimento de pesquisa com relação aos parâmetros de pulsação de corrente na qualidade do cordão e estabilidade do processo.

5.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS DO CONTROLE DA TRANSFERÊNCIA DE GOTAS POR CORRENTE PULSADA

A utilização da pulsação da corrente no processo MIG/MAG tem como objetivo principal realizar a transferência metálica sem a ocorrência de curto-circuito. Isso confere ao modo Pulsado alguns diferenciais em relação à soldagem com transferência convencional, como por exemplo: uma drástica redução do nível de respingos, um aumento relativo da tensão elétrica para uma mesma velocidade de arame e assim a obtenção de uma geometria do cordão de solda com melhor adequação. Esta última característica é especialmente perceptível na soldagem de aços inoxidáveis devido à baixa capacidade de molhamento destas ligas e na soldagem de ligas de alumínio, que, por possuírem alta condutividade térmica, também causam pouco molhamento. Assim, comparada com a transferência por curto-circuito, a transferência pela utilização de corrente pulsada utiliza uma potência maior para a mesma velocidade de arame.

Dois critérios fundamentais devem ser atentados como premissa da seleção do conjunto de variáveis. Em primeira instância é que as variáveis elétricas selecionadas sejam tal que a velocidade do arame se equilibre com a velocidade de fusão do mesmo. O segundo critério é que a cada período corresponda uma gota transferida. Para o cumprimento do primeiro critério não há uma dependência crucial de variáveis específicas, já que todas influenciam de maneira idêntica. Já para o cumprimento do segundo critério, a corrente de pulso (I_p) e seu respectivo tempo (t_p) são as variáveis determinísticas. Entretanto, a primeira é ainda mais relevante, sendo considerada pela maioria dos autores como em segundo grau em relação à segunda. Desse modo, segundo a literatura, é definida uma constante de destacamento de gota como $D = I_p^2 \times t_p$. Os trabalhos de Amin consideram que a corrente de pulso possui um expoente igual a 2,3 [38,39]. A restrição de seleção

individual destas variáveis é tão somente quanto ao valor mínimo da corrente de pulso, que tem de ser superior ao limite superior da faixa de transição entre o curto-circuito convencional e a transferência goticular axial, designada convencionalmente como spray. O valor da corrente de transição está diretamente relacionado com o diâmetro do arame, tipo do material, gás, entre outros. De modo geral, para arames de alumínio com 1,2 mm de diâmetro e gás argônio, o valor citado por alguns autores é de 135 ± 5 A [40]. Entretanto, embora o conjunto de variáveis I_p e t_p possa atender ao requisito de uma gota por pulso, obedecendo a constante de destacamento, é constatado que nem a estabilidade da transferência e nem a solda obtida com cada par de variáveis são iguais.

Além desses aspectos globais de controle da transferência de uma gota por pulso, há aspectos muito específicos que vão às minúcias, como o instante temporal em que as gotas são transferidas. Existem proposições de que o destacamento ocorra no final da fase de pulso e proposições de destacamento no início da fase de base.

Adicionalmente, há um aspecto vital na soldagem de ligas de alumínio que transcende a estabilidade da transferência com muito maior relevância, pois pode produzir a interrupção do processo. Trata-se do desequilíbrio da velocidade de fusão do eletrodo em relação à sua velocidade de alimentação. Este desequilíbrio não ocorre quando a transferência metálica está na faixa do curto-circuito, conforme apresentado por Kiyohara [32], porque para uma determinada corrente de soldagem e uma velocidade de arame, há somente uma tensão média possível. Isto é visualmente verificável pela observação do diagrama cartesiano tensão x corrente para velocidades de arames fixas (Figura 35), pois a linha que representa uma mesma velocidade de arame é inclinada em relação aos dois eixos cartesianos. Entretanto, quando o mecanismo de transferência não mais é dependente da ocorrência de curtos, a referida linha é essencialmente vertical. Isto significa que diferentes tensões satisfazem o equilíbrio da velocidade de fusão. Idêntico comportamento ocorre também com aço, mas neste, o comprimento do arco fundamentalmente não é alterado porque existe uma resistividade apreciável do arame, o que não é o caso das ligas de alumínio. Por isso, há nessas ligas uma tendência de haver oscilações no comprimento do arco quando da utilização de fontes de corrente. Em consequência disso, vários fabricantes de fontes de soldagem anunciam que seus equipamentos são dotados de sistemas adaptativos, os quais previnem tal inconveniente. Não obstante, o modo como é estruturado o conjunto de variáveis, produzindo os destacamentos das gotas temporalmente distintos e ainda com diâmetros também distintos, pode

influir na questão da citada instabilidade do comprimento do arco. Por isso, a metodologia a seguir foi programada para contribuir na demonstração destes fatos.

5.2. METODOLOGIA

A análise foi restrita ao arame ER4043 de 1,2 mm, a uma corrente média fixa de 80 A, com quatro conjuntos de variáveis de pulso, tentando obedecer a região de parâmetro de destacamento de uma gota por pulso [38], segundo a filosofia original da corrente pulsada. De acordo com Amin, o expoente de I_p deve ser 2,3, mas muitos autores [41,42,43] utilizam 2,0 como expoente. Considerando estes dois valores, as curvas correspondentes às referidas equações foram representadas na Figura 46 a fim de uma ampla visualização do campo possível de regulação para obtenção de uma gota por período. Cada um dos quatro grupos de variáveis foi analisado para três diâmetros de gota (dg) diferentes: 1,10 – 1,20 e 1,44 mm. Para o cálculo das variáveis da onda pulsada foi adotada a velocidade do arame de 4 m/min, a qual produzia um comprimento do arco de aproximadamente 5 mm para uma DBCP de 15 mm. Assim, as variáveis resultaram, conforme a Tabela 9. Para a corrente de pulso de 160 A e tempo de base de 5,7 ms, fisicamente não é possível sua realização para diâmetro de gota de 1,1 mm porque resultaria numa corrente de base negativa. A avaliação da estabilidade dos procedimentos foi procedida por meio de depósito sobre chapa na posição plana e velocidade de soldagem fixada em 6,67 mm/s (40 cm/min), com aquisição de dados para a elaboração de oscilogramas e ciclogramas e filmagem de alta velocidade. Para todas as combinações de variáveis apresentadas na Tabela 9 foi calculado o índice de estabilidade ϕ proposto por Gosh [11,12], com a pressuposição que o mesmo não representa o que a ele é atribuído (quanto menor o valor de ϕ , maior a estabilidade).

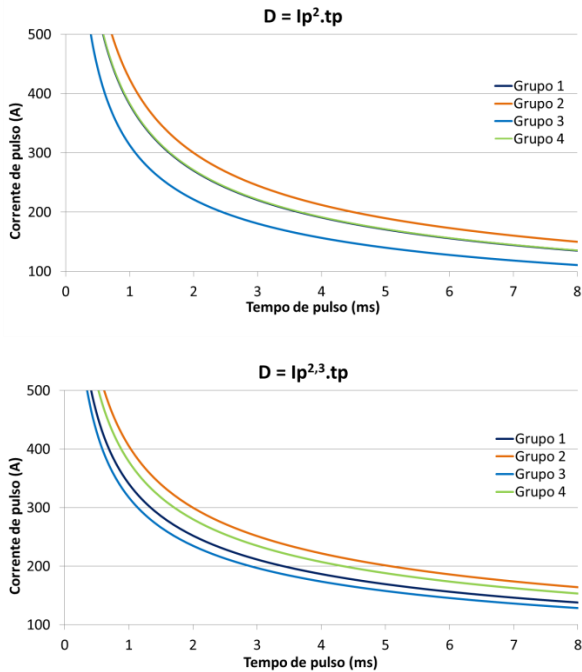


Figura 46 – Curvas representativas de parâmetros de destacamento de gota (Curvas sobrepostas para os grupos 1 e 4 do gráfico $D=I_p^2 \cdot t_p$)

Tabela 9 – Conjunto de parâmetros de soldagem MIG-P, com cálculo de ϕ e constante de destacamento de gotas (D)

Grupo	Cód.	I_p (A)	t_p (ms)	d_g (mm) projetado	I_b (A)	t_b (ms)	$\phi =$ (I_b/I_p) * f_{tb}	$D =$ $I_p^2 \cdot t_p$ ($A^2 \cdot ms$)	$D =$ $I_p^{2,3} \cdot t_p$ ($A^{2,3} \cdot ms$)
1	1	160	5,7	1,1	-25	4,3	-	145920	668884
	2	160	5,7	1,2	18	7,3	0,0632		
	3	160	5,7	1,44	53	16,8	0,2473		
	4	300	2	1,1	25	8	0,0667		
2	5	300	2	1,2	40	11	0,1128	180000	996343
	6	300	2	1,44	59	20,5	0,1792		
	7	350	0,8	1,1	57	9,2	0,1498		
3	8	350	0,8	1,2	62	12,2	0,1662	98000	568128
	9	350	0,8	1,44	70	21,7	0,1929		
	10	350	1,2	1,1	37	8,8	0,0930		
4	11	350	1,2	1,2	53	10,8	0,1363	147000	852193
	12	350	1,2	1,44	65	21,3	0,1758		

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como já foi mencionado, o primeiro conjunto de variáveis (cód.1) resulta em uma impossibilidade física de execução. O segundo conjunto (cód.2) resultou nos oscilogramas da Figura 47A e no ciclograma da Figura 47B. O depósito obtido é o apresentado na Figura 48. A análise da filmagem revela que a transferência de gotas acontece de forma bastante irregular, ocorrendo momentos em que a gota destaca no pulso e outros na base, aparecendo ainda situações de duas gotas por pulso e até mesmo pulsos de corrente que não destacam nenhuma gota. O oscilograma de tensão mostra tal irregularidade, com pulsos de destacamento em diferentes instantes. O ciclograma (Figura 47B) é outro testemunho da irregularidade.

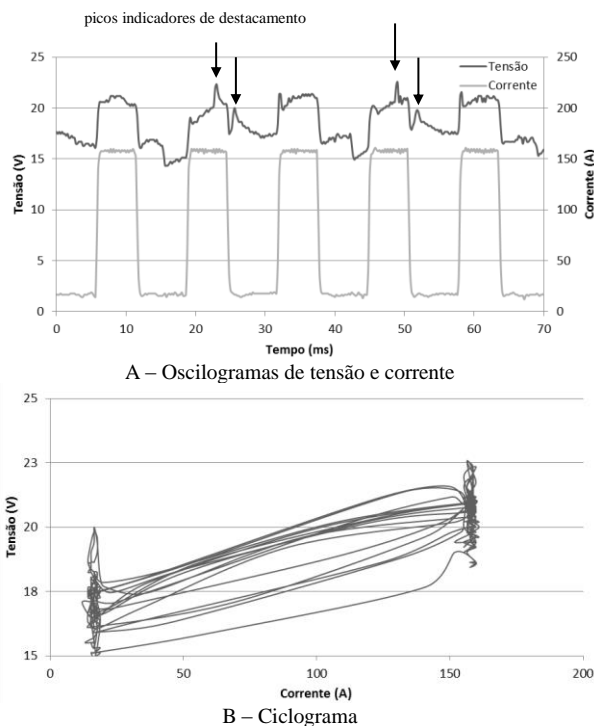


Figura 47 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 160$ A, $t_p = 5,7$ ms, $I_b = 18$ A, $t_b = 7,3$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm

É notório que não existe uma boa repetitividade, apesar do depósito de solda apresentar uma aparência razoável com textura lisa. Conforme comparações futuras, a causa desta aparência pode ser atribuída a pequena velocidade das gotas em razão delas serem expelidas em corrente relativamente baixa. O fator ϕ foi o menor de todos os conjuntos.

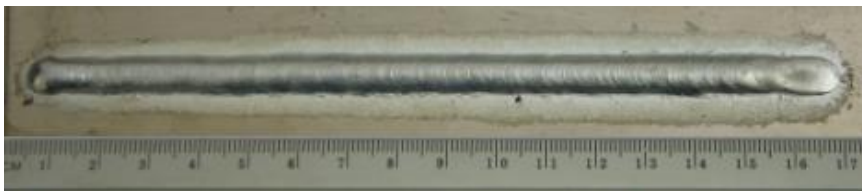
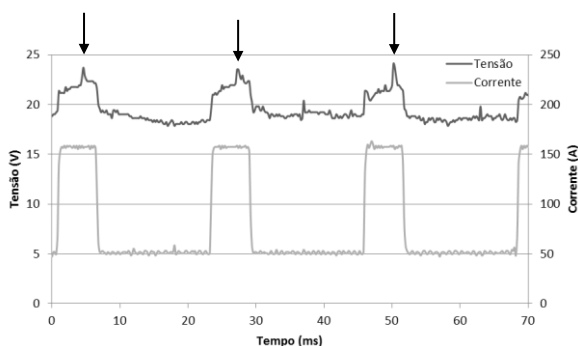


Figura 48 - Depósito de solda referente aos dados da Figura 47

O terceiro conjunto de variáveis (cód.3) resultou nos oscilogramas da Figura 49A e foi constatado que as gotas foram destacadas sempre no pulso. Pela observação do ciclograma, a estabilidade do procedimento foi melhor do que o anterior, apesar de um fator ϕ maior. O depósito de solda resultante (Figura 50) também revela um melhor acabamento. O ciclograma (Figura 49B) é também menos disperso.



A – Oscilogramas de tensão e corrente

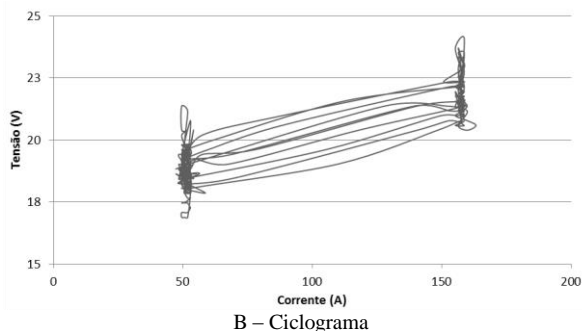


Figura 49 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 160$ A, $t_p = 5,7$ ms, $I_b = 53$ A e $t_b = 16,8$ ms e diâmetro de gota de 1,44 mm



Figura 50 - Cordão de solda referente aos dados da Figura 49

O segundo grupo de ensaios, que possui como parâmetros de pulso uma corrente de 300 A com um tempo de 2 ms, sendo composto pelos conjuntos cód.4, cód.5 e cód.6, resultou em cordões com baixa qualidade no acabamento e com o aparecimento de alguns salpicos finos. Os sinais oscilográficos revelam uma razoável estabilidade. Entretanto, a visualização do momento de destacamento das gotas não apareceu de forma evidente nos oscilogramas de tensão. Utilizando-se da filmagem em alta velocidade foi detectado que a gota é destacada durante o momento do pulso e que a quantidade de energia sobressaliente promove a continuidade da fusão do arame que, em algumas situações, ocasiona o destacamento de uma segunda gota com menor diâmetro (Figura 51B). Quando essa segunda gota não é expelida ocorre um efeito repulsivo tipo “chicote” com o material fundido na ponta do arame (Figura 51A), originando os já referidos salpicos finos. Dos três conjuntos de variáveis deste grupo, o de código 4 também apresenta um fator ϕ baixo, sendo o segundo na ordem crescente.

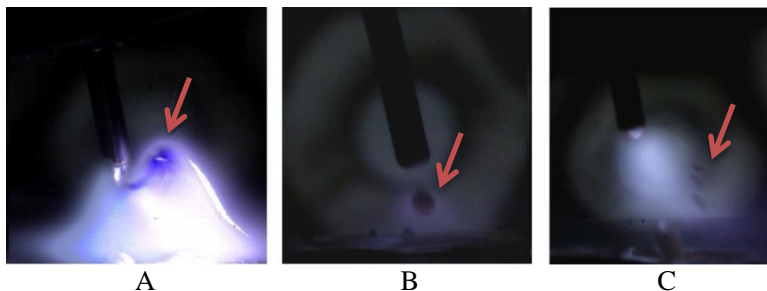


Figura 51 – Comportamento da transferência metálica para o segundo grupo de ensaios ($I_p=300$ A e $t_p=2$ ms);

A – Efeito repulsivo para o conjunto de parâmetros com diâmetro de gota 1,1 mm; B – Destacamento da segunda gota no conjunto para $d_g = 1,2$ mm; C – Formação de respingos no conjunto com $d_g = 1,44$

Em todos os três conjuntos, cód.7, cód.8 e cód.9, contidos no terceiro grupo de ensaios, com $I_p=350$ A e $t_p=0,8$ ms, o destacamento da gota aconteceu no início do tempo de base. Quando o diâmetro de gota teórico foi de 1,1 mm, ou seja, conjunto cód.7, apesar do oscilograma ter demonstrado um comportamento estável, foi verificada na filmagem a formação de respingos em consequência de um efeito repulsivo sobre o material fundido imediatamente após o destacamento da gota (Figura 52).

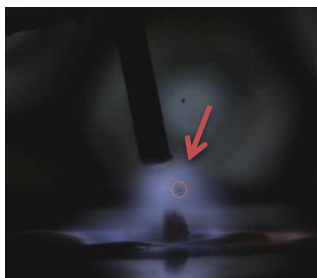
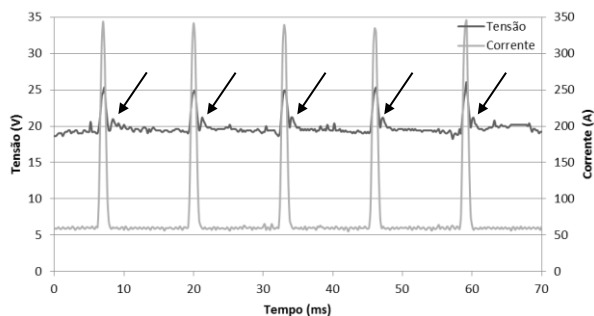


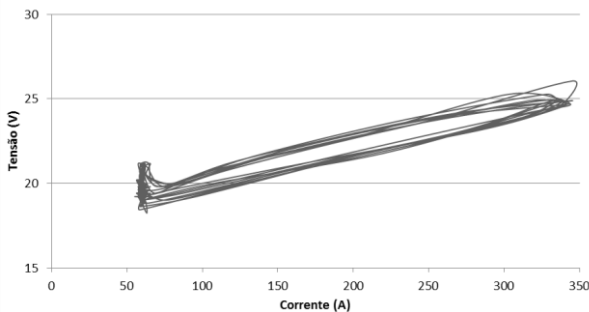
Figura 52 – Destacamento de gota para o conjunto cód.7 com $I_p= 350$ A, $t_p= 0,8$ ms, $I_b= 57$ A e $t_b= 9,2$ ms para diâmetro de gota de 1,1 mm

Com o aumento do diâmetro de gota para 1,2 mm, a tensão de base permaneceu bastante estável e houve somente uma gota em cada início da fase de base (Figura 53). O depósito de solda resultou em uma textura lisa (Figura 54) como no caso do conjunto 2 (160 A e 5,7 ms). A razão para isto pode ser atribuída à menor velocidade das gotas, pois

foram expelidas na fase de base (62 A). O valor de ϕ foi relativamente elevado, revelando não ser uma informação confiável.



A – Oscilogramas de tensão e corrente



B – Ciclograma

Figura 53 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 350$ A, $t_p = 0,8$ ms, $I_b = 62$ A e $t_b = 12,2$ ms e diâmetro de gota de 1,2 mm



Figura 54 - Depósito de solda referente à Figura 53

Os picos de tensão referentes ao momento do destacamento de gota foram bem maiores para 1,44 mm de diâmetro de gota (Figura 55). Somado ao grande tempo de base, isto pode contribuir com certo grau da instabilidade.

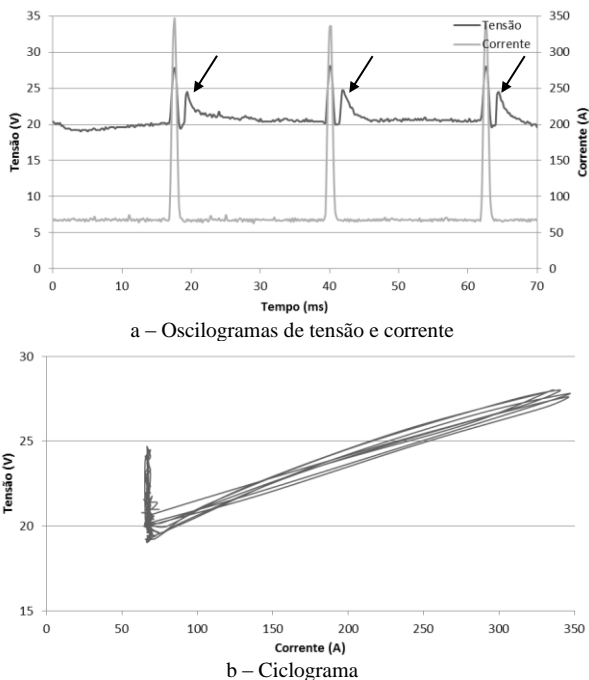


Figura 55 – Aquisição de dados referentes ao depósito de solda com $I_p = 350$ A, $t_p = 0,8$ ms, $I_b = 70$ A e $t_b = 21,7$ ms e diâmetro de gota de 1,44 mm

Para os conjuntos cód.10, cód.11 e cód.12, com corrente de 350 A e tempo de pulso de 1,2 ms, foi constatado que o destacamento de gota acontece durante o pulso de corrente. Como já ocorreu para os outros casos com o diâmetro de gota de 1,1 mm, não há no oscilograma de tensão um indicativo da transferência. Esta só é confirmada com a filmagem de alta velocidade. Já para diâmetro de gota de 1,2 mm, reapareceram no oscilograma de tensão os picos relativos à transferência. O destacamento da gota em um alto nível de corrente provocou um alongamento da gota (Figura 56A). Para diâmetro de gota de 1,44 mm há novamente uma forte influência sobre os picos de tensão no respectivo oscilograma e que somada ao grande tempo de base, produz uma forte instabilidade do processo. A filmagem realizada com esse parâmetro mostra a formação de respingos logo após o destacamento da gota (Figura 56B). Em todos os conjuntos desse grupo, o depósito de solda ficou com aparência de que houve uma forte pressão

do arco, com gotas muito aceleradas, como pode ser observado para o caso do conjunto cód.10 na Figura 57.



Figura 56 - Comportamento da transferência metálica ($I_p=350$ A; $t_p=1,2$ ms); A – Alongamento da gota no conjunto 11 com dg 1,2mm; B – Formação de respingos no conjunto 12 com dg = 1,44



Figura 57 - Depósito de solda com $I_p = 350$ A, $t_p = 1,2$ ms, $I_b = 37$ A e $t_b = 8,8$ ms e diâmetro de gota de 1,1 mm

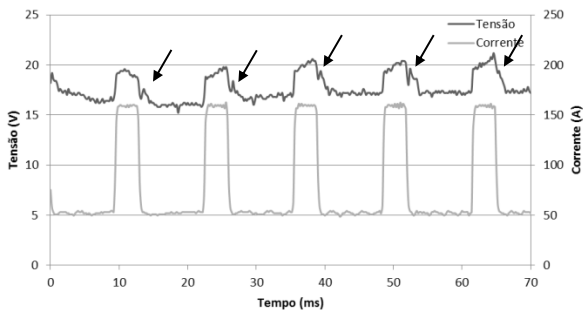
De todos os conjuntos de variáveis, o que apresentou melhores resultados foi o oitavo (cód.8, $I_p=350$ A, $t_p=0,8$ ms e $d_g=1,2$ mm). Aplicando os respectivos valores do parâmetro de destacamento (D) para uma corrente de pulso de 240 A (valor adotado por uma das mais famosas empresas fabricantes de fontes de soldagem), resulta nos valores aproximados de $t_p=1.9$ ms para o expoente 2,3 de I_p e 1,7 ms para o expoente 2,0. Os novos conjuntos de parâmetros obedecem aos dados da Tabela 10. O valor de D para $I_p^{2,3}$ do cód. 13 e o valor de D para I_p^2 do cód. 14 deveriam ser idênticos aos valores do grupo 3 da Tabela 9, entretanto, a diferença observada é consequência dos arredondamentos nos tempos de pulso. Foram procedidos ensaios respectivos a estas duas condições, os quais revelaram boas condições de soldagem, mas não superiores à condição de 350 A e 0,8 ms. Analisando os oscilogramas foi constatado que para esses dois conjuntos, codificados em 13 e 14 na Tabela 10, o destacamento da gota aconteceu durante o pulso de corrente. Diminuindo o tempo de pulso

para 1,6 ms (cód. 15 da Tabela 10) observou-se que o destacamento ocorreu no início do tempo de base, a exemplo do conjunto 8.

Tabela 10 – Conjunto de variáveis de soldagem MIG-P com $I_p=240\text{ A}$ e valores de ϕ

Grupo	Cód.	I_p (A)	t_p (ms)	d_g (mm) projetado	I_b (A)	t_b (ms)	$\phi =$ (I_b/I_p) $\cdot t_{fb}$	$D =$ $I_p^2 \cdot t_p$ (A ² .ms)	$D =$ $I_p^{2,3} \cdot t_p$ (A ^{2,3} .ms)
5	13	240	1,9	1,2	53	11,1	0,1887	109440	566552
	14	240	1,7	1,2	56	11,3	0,2031	97920	506915
	15	240	1,6	1,2	58	11,4	0,2121	92160	477096

Com os dois pontos de corrente e tempo de pulso onde o destacamento de gota aconteceu no início do tempo de base, conjunto 8 e 15, foi possível determinar um novo expoente para a relação $I_p^x \cdot t_p = D$, uma vez que a constante de destacamento para esses dois pontos seria, teoricamente, igual. A fim de validar o novo valor de 1,83 encontrado para o expoente de I_p , foram obtidos os valores de tempo de pulso para as correntes de 160 A, 200 A e 300 A, sendo 3,4 ms, 2,2 ms e 1,1 ms, respectivamente. Em uma nova sequência de ensaios sob esses parâmetros de pulso e considerando o $d_g=1,2\text{ mm}$, foi constatado que, em todos os casos, o destacamento da gota ocorreu logo no início da base, como colocado na Figura 58.



A – $I_p = 160\text{ A}$, $t_p = 3,4\text{ ms}$

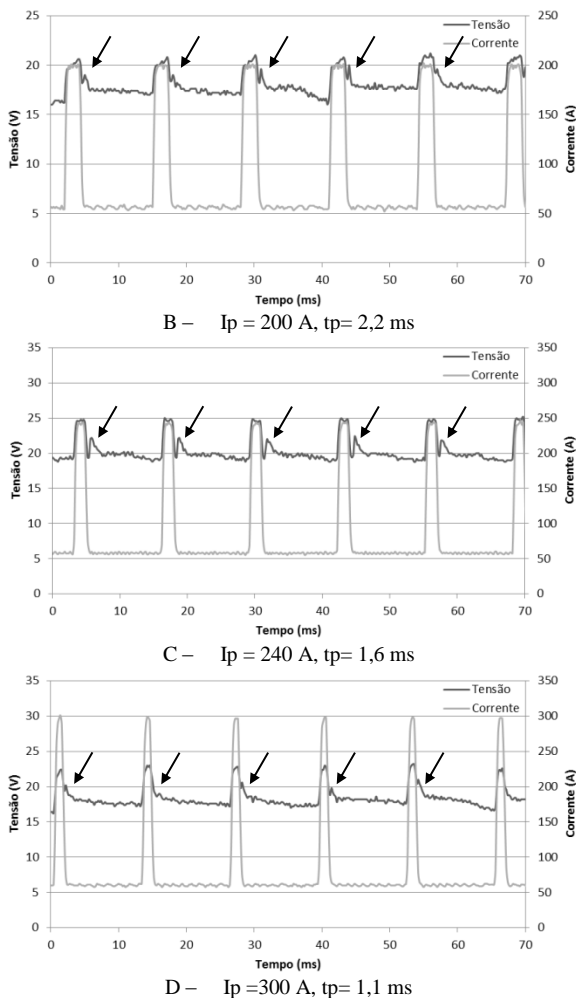


Figura 58 – Aquisição de dados referentes aos depósitos para validação da relação $I_p 1,83 \cdot t_p = D$

Ainda que haja uma correta seleção das variáveis que compõem a onda pulsada, como aqui descrito, propiciando o maior grau de repetitividade, a estabilidade com relação à manutenção do comprimento do arco não é absoluta, mesmo que melhor do que nos outros casos. Por isso, foi aplicado um controle adaptativo baseado na leitura da tensão de base, já que os autores deste trabalho estão de

acordo com o proposto por Zhiming e Al-Erhayem [28]. Estes autores afirmam que as variações de resistência do arco, dissipação térmica e resistência no contato pouco influenciam a precisão da medição, sugerindo assim que a aquisição seja feita no tempo de base. Por outro lado, Essers e Gompel [29] citam que devido à grande quantidade de emissão de elétrons durante elevados valores de corrente, a leitura de tensão durante este período representaria melhor o comprimento do arco.

A metodologia aplicada para realizar o controle da altura do arco consiste em medir a tensão durante o tempo de base e comparar com uma referência fornecida pelo usuário. De acordo com o erro, o sistema atua no valor da corrente média (I_m), recalculando a corrente de base (I_b) para o novo valor de I_m , se I_b ficar abaixo do valor mínimo é feito o recálculo tp tempo de base. Quando a altura de arco é restabelecida, I_m retorna ao valor original, retornando as condições otimizadas de destacamento de gota. A redução nos valores de tensão lidos durante a base corresponde a uma redução no comprimento do arco, ou seja, uma necessidade de aumentar a fusão do eletrodo para que seja mantido o valor de referência regulado pelo operador. No exemplo da Figura 59 o referido valor foi de 20,5 V, que é a tensão média, obtida do tempo de base no oscilograma da Figura 58C. Percebe-se claramente no exemplo a variação dos níveis da corrente de base durante a oscilação ocorrida no sinal de tensão.

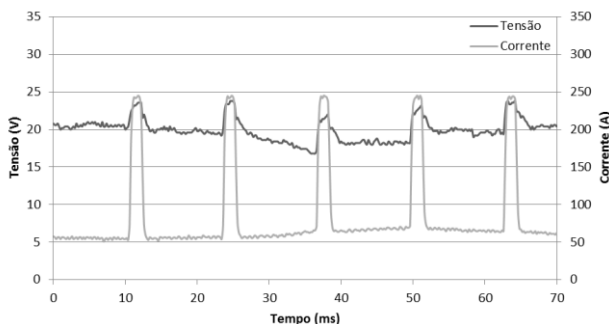


Figura 59 – Oscilograma de tensão e corrente que mostra a atuação do sistema adaptativo de controle da altura do arco

O resultado foi excelente, não havendo alterações do comprimento do arco, seja por causas fortuitas, seja por causa intencional, como em alguns ensaios onde a variação de DBCP aconteceu de 15 mm a 28 mm.

6. CONCLUSÕES

A soldagem de alumínio tem suas dificuldades e o desenvolvimento de pesquisa sobre o assunto contribui para a obtenção de resultados cada vez mais aprimorados. O trabalho abordou vários temas dentro desse contexto, trazendo informações relevantes a respeito da soldagem e das variantes do processo MIG aplicáveis ao alumínio. Com isso, as principais conclusões alcançadas com o presente trabalho são:

- As versões MIG que oferecem uma transferência por curto-circuito demonstraram maiores condições de execução de uma solda de raiz em alumínio, por isso o destaque para o CMT;
- As versões CMT Advanced e Advanced pulse, apesar de virem ao mercado com o propósito de alta bridgibility, não forneceram energia suficiente para a soldagem de raiz em chapas de 6 mm;
- O CMT se mostrou capaz de realizar uma solda de raiz, produzindo cordões com bons acabamentos tanto na face como na raiz da solda;
- Os ensaios que avaliaram o controle da velocidade de arame do CMT em condições de variação de altura poderão servir como base para o desenvolvimento de um sistema automático de correção de trajetória;
- As comparações realizadas entre o CMT e o MIG convencional retornaram resultados não esperados ao que é dito por um processo frio. O CMT apresentou uma maior potência que o MIG Convencional;
- As constatações levam a conclusão de que o CMT não é bom porque é mais frio, mas sim pelo seu controle na transferência metálica, sua estabilidade e quase perfeita cadência entre as fases de alta e baixa potência;
- Com relação ao MIG pulsado, para as condições e materiais testados, fica evidenciado que os melhores resultados foram obtidos quando o destacamento aconteceu em baixos níveis de energia, para diâmetros de gota iguais ao do arame;
- Os trabalhos de Gosh [11,12] indicam, de modo geral, que os melhores resultados em termos de estabilidade são conseguidos para baixos valores de ϕ , o que diverge dos resultados encontrados;
- O conjunto de parâmetros $I_p = 350$ A e $t_p = 0,8$ ms produziu os melhores resultados e, apesar de o conjunto $I_p = 240$ A e $t_p = 1,6$ ms apresentar características visualmente semelhantes, o primeiro

oferece uma maior rigidez do arco e ainda uma maior gama de trabalho com baixos níveis de corrente média;

- O conjunto de parâmetros $I_p = 350 \text{ A}$ e $t_p = 0,8 \text{ ms}$ já está sendo aplicado nos programas sinérgicos de fontes de soldagem comercialmente disponíveis.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As atividades desenvolvidas neste trabalho mostram o grande potencial de pesquisa que a soldagem MIG de alumínio oferece. Com isso, algumas sugestões para continuidade nos trabalhos são:

- Desenvolver uma versão sinérgica para o MIG curto-circuito controlado ou uma nova variante do processo que permita a utilização na soldagem de alumínio;
- Avaliar a capacidade *bridgibility* para as versões CMT Advanced e CMT Advanced Pulse e sua relação limite com gap/espessura de chapa;
- Desenvolver programas sinérgicos para a soldagem MIG AC de alumínio, comparando resultados em termos de *bridgibility* com as variantes CMT Advanced e CMT Advanced Pulse;
- Avaliar a utilização do comportamento de variação da velocidade de arame das versões MIG CMT nas soldagens com mudança de DBCP para uma possível implementação de um sistema de correção automática de trajetória.

8. REFERÊNCIAS

1. ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A. Manual de Soldagem. São paulo. 1993.
2. DUTRA, J. C. et al. Estabilidade do arco voltaico TIG em corrente alternada. Associação Brasileira de Soldagem. Recife - PE, p. 577 - 589. 1991. Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem.
3. SILVA, C. L. M. Avaliação da Técnica de pulsação Térmica na soldagem de Alumínio. Universidade Federal de Uberlândia, p. 226. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia).
4. TUTTLE, W. Understanding Aluminum Welding. Welding Journal, Vol.70, n. 2, Fevereiro 1991. 43-46.
5. DUTRA, J. C. MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito - Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 019-024, Jan/Mar 2008.
6. SOUZA, D. et al. Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol.16, n. 2, Abr/Jun 2011. 114-122.
7. DUTRA, J. C. Contribuição ao Estudo da Soldagem Elétrica a Arco Voltaico sob Atmosferas de Argônio e Dióxido de Carbono. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 58. 1976. Dissertação (Mestrado em Engenharia).
8. DUTRA, J. C. Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 151. 1989. Tese (Doutorado em Engenharia).
9. LABSOLDA - UFSC. Filmagem em alta velocidade: Soldagem vertical MIG Alumínio - CMT. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_atuais/soldanaval_videos.php>. Acesso em: 16 jan. 2012.

10. PICKIN, C. G.; WILLIAMS, S. W.; LUNT, M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.211, Março 2011. 496-502.
11. GHOSH, P. K. et al. Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 194, novembro 2007. 163-175.
12. GHOSH, P. K. et al. Thermal and metal transfer behaviours in pulsed current gas metal arc weld deposition of Al-Mg alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11, março 2006. 232-242.
13. CIRINO, L. M. Estudo dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG. UFSC. Florianópolis, p. 112. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia).
14. PINTO, H. et al. A Comparative Study of Microstructure and Residual Stresses of CMT-, MIG- and Laser-Hybrid Welds. *Materials Science Forum*, 524-525, setembro 2006. 627-632.
15. FENG, J.; ZHANG, H.; HE, P. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. *Materials and Design*, 30, 2009. 1850-1852.
16. EGERLAND, S. A. Status and Perspectives in Overlaying under Particular Consideration of Sophisticated Welding Processes. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 27, n. n°2, 2009. 50-54.
17. KIM, C. Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions. *Materials Science Forum*, 654-656, Junho 2010. 350-353.
18. FOKENS, R. Cold Metal Transfer - CMT - A Revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding. 4th Pipeline Technology Conference. Hannover, Germany. 2009.
19. BRUCKNER, J. Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to

Aluminum. Welding Journal, Vol.84, n. 6, Junho 2005. 38-40.

20. ZHANG, H. T.; FENG, J. C.; HE, P. Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought aluminium. Materials Science and Technology, novembro 2008. 1346-1349.
21. ZHANG, H. T. et al. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel. Materials Science and Engineering, 499, Janeiro 2009. 111-113.
22. FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. CMT Process - Practises "Energy Saving" - Green Thinking. [S.l.]. Slides de apresentação.
23. FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. Manual de instrução de operação - Controle Remoto RCU5000i. [S.l.], p. 241. 2010.
24. PICKIN, C. G.; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 11, n. 5, 2006.
25. TECHNOLOGY and application innovations with CMT Advanced. FRONIUS International GMBH, 2009. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xml/68_15988_ENG_HTML.htm>. Acesso em: 04 junho 2012.
26. SANTOS, T. F. Soldagem MIG com Corrente Alternada MIG CA. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 115. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia).
27. KAZMAIER, J. CMT Advanced Technology - An Arc Process Revolution. FRONIUS International GMBH. Wels-Thalheim, Austria. 2010.
28. ZHIMING, O.; AL-ERHAYEM, O. Feedbacksteuerung zum metall-schutzgasschwei en mit impulslichtbogen. Schweißen und Schneiden, 41, 1989.
29. ESSERS, W. G.; GOMPEL, M. R. M. V. Arc Control with Pulsed GMAW Welding. Welding Journal, USA, June 1984. 26-32.
30. SILVA, R. H. G. Soldagem MIG/MAG em transferência metálica

- por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 127. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia).
31. IMC Soldagem. SAP-4 - Sistema de Aquisição Portátil. Disponível em: <http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html>. Acesso em: 03 jan. 2012.
 32. KIYOHARA, M.; YAMAMOTO, H.; HARADA, S. Melting characteristics of a wire electrode in the MIG-welding of aluminum. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, 1979. p. 165-175.
 33. QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico. Florianópolis: EDEME, 1979. 248 p.
 34. CORRÊA, M. A. Diretrizes de projeto e qualificação metrológica de sistemas de medição de grandezas elétricas em processos de soldagem a arco. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 77. 1999. dissertação (Mestrado em Engenharia).
 35. JOSEPH, A. et al. Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8, n. 6, 2003. 400-406.
 36. NASCIMENTO, A. S. et al. Avaliação dos Métodos de Cálculo de Potência Elétrica em Soldagem a Arco e as Consequências sobre as Previsões geométricas, térmicas e metalúrgicas da junta. Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. Vol.12, n. 2, p. 97-106, junho 2007.
 37. REIS, R. P. et al. Influência do material de base sobre o rendimento de fusão em soldagem a arco. Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol. 16, n. 4, Out/Dez 2011. 369-376.
 38. AMIN, M. Pulse current Parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. Metal Construction, 15 (5), May 1983. 272-278.
 39. AMIN, M. Synergic pulse MIG welding. Metal Construction, 13 (6), June 1981. 349-353.
 40. LINCOLN ELECTRIC. Aluminum Welding Guide. [S.l.], p. 32.

Disponível em: http://www.lincolnelectric.com/assets/en_US/Products/Consumable_AluminumMIGGMAWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5556/c8100.pdf.

41. DUTRA, J. C.; OLLÉ, L. F.; GOHR, R. J. O processo MIG/MAG Pulsado com pulsação térmica. XXI Encontro Nacional de Tecnologias de Soldagem. Caxias do Sul, p. 889-902. 1995.
42. GOHR JR, R. Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 165. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia).
43. PALANI, P. K.; MURUGAN, N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology, 172, 20 February 2006. 1-10.